

**CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC**  
**GRUPO DE INVESTIGACION EN OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA (GIOPEN)**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**INFORME TECNICO IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CRÍTICAS DE CONSUMO DE LA  
ENERGIA EN UNA INDUSTRIA DEL SECTOR QUÍMICO.**

**Elaborado por:**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA - GIOPEN**

**BARRANQUILLA.  
AGOSTO-2015**

## Índice

1. Resumen .....	2
2. Objetivos de la etapa desarrollada.....	2
3. Cronograma de ejecución del proyecto y actividades realizadas en esta etapa.....	2
4. Resultados principales.....	3
4.1. Resultados de las mediciones.....	3
4.2. Principales consumidores.....	4
5. Identificación de las principales áreas consumidoras.....	6
5.1. Áreas donde se realizaron las mediciones .....	6
5.2. Equipos de medición empleados .....	6
5.3. Parámetros analizados.....	8
5.4. Resultados de las mediciones.....	9
5.5. Perfil de consumo horario de la empresa .....	51
5.6. Diagrama de Pareto.....	51

## Resumen

Se realizan mediciones en diferentes áreas de la empresa identificando el área de carga de batería como la mayor consumidora de energía, se detectan transformadores muy cargados y otros con bajo factor de carga, se identifican cuales son los motores de mayor capacidad en la empresa donde algunos al igual que los transformadores tienen bajo factor de carga y otros están muy cargados. Se identifican un grupo de variadores de velocidad que se encuentran colocados a una frecuencia fija de 60 Hz lo cual no brinda ahorro de energía y si crea distorsiones en la red eléctrica. Se realizan una revisión del sistema de aire comprimido donde se observó que los compresores no paran; en un recorrido por todo el sistema se pudo detectar que existen fugas de valor considerable en el sistema de aire comprimido.

### 1. Objetivos de la etapa desarrollada.

Tabla 1. Objetivos de la etapa desarrollada.

Etapa	Actividades
Identificación de áreas críticas	Censo de carga. Identificación de las posibles áreas críticas. Medición del consumo de las áreas identificadas. Elaboración del diagrama de Pareto de las áreas significativas.

### 2. Cronograma de ejecución del proyecto y actividades realizadas en esta etapa.

Tabla 2. Chequeo del cronograma de ejecución.

Etapa	Semanas Ejecución																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Análisis de información preliminar	X	X																							
Evaluación energética de operación controlada de la planta			X	X	X	X	X	X	X	X															
Identificación de áreas críticas											X	X	X	X											
Evaluación de las áreas críticas																									
Elaboración del informe final																									

Tabla 3. Actividades realizadas en esta etapa.

Actividades
1. Reunión de coordinación sobre las actividades para la puesta en marcha de la operación controlada de la planta. 2. Se identifican junto el jefe de mantenimiento las áreas principales consumidoras de energía y se propone un plan de mediciones.
1. Se comienza la medición en los dos transformadores de la subestación 2 que alimentan a las mesas de carga. 2. Se puntualiza sobre los datos que se registran en las mesas de carga.
1. Se realiza un chequeo de las mediciones.
1. Se descarga la información de los analizadores de redes y se programa la medición por otra semana en los mismos transformadores. 2. Se recibe la información de producción y consumo de energía
1. Se finaliza las mediciones en las mesas de carga y se descarga la información correspondiente. 2. Se comienza a medir el área administrativa y el área de compresores. 3. Se recibe la información de producción y consumo de energía 4. Se realiza un recorrido de planta para la identificación de oportunidades de ahorro.
1. Se finaliza las mediciones del área administrativa y se descarga la información correspondiente. 2. Se chequean las mediciones en el área de compresores. 3. Se realiza mediciones de la potencia instantánea de los motores de mayor consumo de la empresa. 4. Se actualiza la información de la producción y el consumo de energía.
1. Se finaliza las mediciones en el área de compresores y se descarga la información correspondiente. 2. Se comienza a medir el motor del colector de polvo. 3. Se actualiza la información de la producción y el consumo de energía.
1. Se finalizan las mediciones al motor del colector de polvo. 2. Se actualiza la información de la producción y el consumo de energía.
1. Sesiones de trabajo para la integración del informe

### 3. Resultados principales.

#### 3.1. Resultados de las mediciones.

- En el Circuito 1 (subestación 1) el factor de carga del transformador tiene picos que llegan al 90%, por lo que debe de evitarse el incremento de la carga.
- En el Circuito 2 (subestación 2, transformador 1, que alimenta a las mesas de carga) el factor de carga del transformador es inferior al 40%, mientras que en el Circuito 3 (subestación 2, transformador 2, que alimenta a las mesas de carga), el factor de carga del transformador es inferior al 60%. Estos resultados demuestran que estos transformadores pueden asumir más carga.
- En el Circuito 2 (subestación 2, transformador 1, que alimenta a las mesas de carga) y Circuito 6 (motor de 60 HP del colector de polvo 1) se detectaron armónicos con nivel superiores a los establecido por las normas. Esto produce pérdidas energéticas adicionales en el sistema eléctrico

de la empresa por el efecto de los armónicos de corriente en los conductores y en las máquinas eléctricas.

- En el Circuito 6 (motor del colector de polvo 1) y Circuito 7 (motor del colector de polvo 2), se observó que el variador de frecuencia acoplado al motor no está ejerciendo ninguna función, pues este trabaja a un régimen de carga prácticamente constante. El variador genera altos niveles de armónicos y pérdidas internas que pueden producir pérdidas de energía estimadas en 35 000 kWh/año, lo que representa aproximadamente una afectación económica anual estimada de \$5 000 000 COP. Por esta razón, en la etapa siguiente del proyecto, se realizará un análisis más profundo con vistas a evaluar la eventual desconexión del variador. Se sugiere además, evaluar el funcionamiento de los otros motores que están conectados con variadores de frecuencia.
- En el Circuito 5 (área de compresores) se comprobó que los compresores trabajan de forma estable. Como esta área es una de los principales consumidores de energía eléctrica, se recomienda evaluar la eficiencia en el uso de aire comprimido en la empresa y realizar un estudio del sistema del flujo de aire comprimido de la empresa.
- De los trece motores medidos, dos están trabajando con bajo de factor de carga. Estos son el motor del equipo de óxido 2 (75 HP) con un factor de carga del 54% y el motor de batería (15 HP) con un factor de carga del 38%. En el caso del motor del equipo de óxido 2, las pérdidas anuales de energía por este concepto se estiman en 6700 kWh, lo que representa aproximadamente \$935 000 COP. Para el motor de batería, las pérdidas anuales se estiman en 1300 kWh, lo que significa pérdidas económicas aproximadas de \$ 190 000 COP. Se recomienda en caso de averías, sustituir el motor del equipo de óxido 2 por uno de 50 HP y el motor de batería por uno de 7,5 HP.
- Se detectó bajo factor de potencia en los circuitos 2, 3, 6 y 7 con valores inferiores a 0,9, lo que contribuye al bajo factor de potencia de la empresa y a la penalización mensual. Llama la atención que en algunos de estos circuitos estén conectados condensadores, sin embargo, no están bien distribuidos o no presentan la capacidad necesaria.
- En los circuitos medidos, el desequilibrio y la variación de tensión estuvieron dentro de los límites establecidos.

### **3.2. Principales consumidores.**

- Para determinar los principales consumidores de energía, se midieron las áreas y equipos de interés propuestos por el personal técnico de la empresa. Como resultado se obtuvo el diagrama de Pareto y el perfil de consumo horario de la empresa. El principal consumidor de energía es el área de las mesas

de carga de las baterías representando el 53,37% del total, los compresores representan el 8,7% y el resto de las cargas analizadas representan menos del 5% cada una. En la tabla 4 se muestran los datos de las principales cargas consumidoras de energía. En la figura 1 se muestra el diagrama de Pareto con los consumidores que representan el 70% del consumo total.

Tabla 4. Principales cargas consumidoras de la empresa.

Áreas y equipos	Energía del total (%)	Energía acumulada (%)
Mesas de carga	53,37	53,37
Compresores y secadora	8,70	62,07
Motor del colector de polvo 1	3,04	65,11
Motor del equipo de óxido 2	2,84	67,95
Motor de metalurgia	2,26	70,21
Área administrativa	1,56	71,77
Motor del colector de polvo 2	1,26	73,03
Motor del ventilador de la torre enfriamiento 3	0,61	73,64
Motor de la lavadora de baterías	0,37	74,01
Motor del ventilador de la torre enfriamiento 2.	0,36	74,37
Bomba de la torre enfriamiento 3	0,34	74,71
Bomba de la mesa de carga	0,31	75,02
Bomba de la torre de enfriamiento 3	0,31	75,33
Bomba de la torre de enfriamiento 2	0,31	75,63
Bomba de la torre de enfriamiento 1	0,29	75,93
Motor del ventilador de la torre enfriamiento 1	0,25	76,18

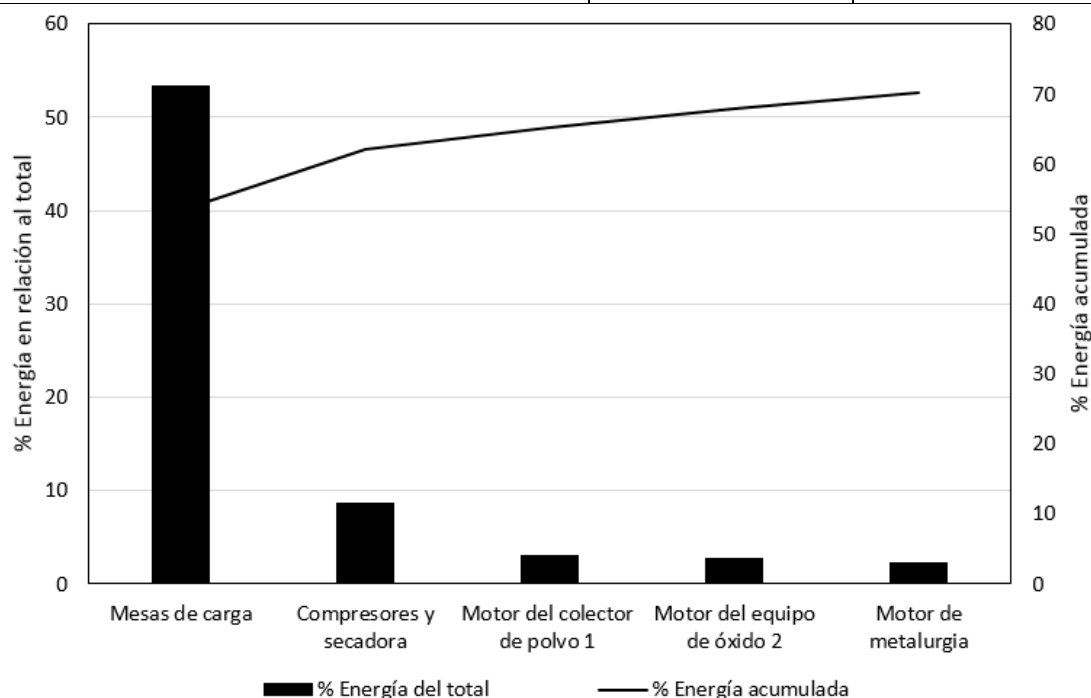


Figura 1. Diagrama de Pareto.

Sobre los principales consumidores identificados, se enfocará la búsqueda de oportunidades de ahorro de energía en la próxima etapa.

#### 4. **Identificación de las principales áreas consumidoras.**

##### 4.1. **Áreas donde se realizaron mediciones:**

- **Circuito 1:** Subestación 1, transformador que alimenta los motores y áreas que no incluyen a las mesas de carga.
- **Circuito 2:** Subestación 2, transformador 1, mesas de carga de baterías.
- **Circuito 3:** Subestación 2, transformador 2, mesas de carga de baterías.
- **Circuito 4:** Área administrativa.
- **Circuito 5** Área de compresores.
- **Circuito 6:** Motor de colector de polvo 1.
- **Circuito7:** Motor de colector de polvo 2.
- **Motores de mayor consumo en la empresa.**

Estas áreas se definieron en conjunto con el personal de la empresa por considerarse las de mayor consumo de energía eléctrica.

##### 4.2. **Equipos de medición empleados:**

- Analizador de redes Fluke 435 II. Clase de instrumento A.
- Analizador de redes Dranetz Power Visa. Clase de instrumento A.
- Pinza vatimétrica modelo Fluke ET-4080.

Tabla 5. Especificaciones del analizador de redes Fluke 435 II.

<b>Magnitud</b>	<b>Rango de medida</b>	<b>Precisión</b>
Tensión (rms)	1 V a 1000 V fase a neutro	$\pm 0,1$ % del voltaje nominal
Corriente (rms)	5 A a 6000 A	$\pm 0,5$ %
Frecuencia	51,000 Hz a 69,000 Hz	$\pm 0,01$ Hz
Factor de potencia	0 a 1	$\pm 0,1$ %
Potencia	Según escala de las pinzas	$\pm 1$ %
Energía	Según escala de las pinzas	$\pm 1$ %
Distorsión de Armónico Total (THD)	0,0 % a 100 %	$\pm 2,5$ %



Figura 2. Analizador de redes Fluke 435 II.

Tabla 6. Especificaciones del analizador de redes Dranetz Power Visa.

<b>Magnitud</b>	<b>Rango de medida</b>	<b>Precisión</b>
Tensión (rms)	1 V a 600 V fase a neutro	$\pm 0,1 \%$ del voltaje nominal
Corriente (rms)	0,1 A a 3000 A	$\pm 0,1 \%$
Frecuencia	45,000 Hz a 65,000 Hz	$\pm 0,01$ Hz
Factor de potencia	0 a 1	$\pm 0,1 \%$
Potencia	Según escala de las pinzas	$\pm 1 \%$
Energía	Según escala de las pinzas	$\pm 1 \%$
Distorsión de Armónico Total (THD)	0,0 % a 100 %	$\pm 2,5 \%$



Figura 3. Analizador de redes Dranetz Power Visa.



Tabla 7. Especificaciones de la pinza vatimétrica modelo Fluke ET-4080.

Magnitud	Rango de medida	Precisión
Tensión (rms)	2 V a 600 V fase a neutro	$\pm 1 \%$ del voltaje nominal
Corriente (rms)	0 A a 1000 A	$\pm 1,5 \%$
Frecuencia	50,000 Hz a 60,000 Hz	$\pm 0,1 \text{ Hz}$
Factor de potencia	0 a 1	$\pm 3 \%$
Distorsión de Armónico Total (THD)	0,0 % a 100 %	$\pm 5 \%$



Figura 4. Pinza vatimétrica modelo Fluke ET-4080.

#### 4.3. Parámetros analizados:

- Desequilibrio de tensión.
- Variación de tensión.
- Distorsión armónica total.
- Factor de potencia.
- Comportamiento de la carga.
- Factor de carga.

##### 4.3.1. Definición de los parámetros:

**Desequilibrio de tensión (DT):** Se define como la máxima desviación de las tensiones de línea en relación a la tensión promedio, dividido por la tensión promedio.

$$DT (\%) = 100 \cdot \frac{\max(|V_{AB}-V_{prom}|; |V_{BC}-V_{prom}|; |V_{CA}-V_{prom}|)}{V_{prom}} \quad (1)$$

Como criterio de evaluación se considera que el circuito se encuentra trabajando en condiciones de desequilibrio de tensión cuando  $DT > 2\%$  en estado estable.

Regulación: CREG-070-1998. Norma: IEEE Std 1159-1995

**Variación de tensión (VT):** Se define como la relación entre la tensión promedio ( $V_{prom}$ ) y la tensión nominal del transformador ( $V_{nom}$ ).

$$VT \text{ (p. u)} = \frac{V_{prom}}{V_{nom}} \quad (2)$$

Se considera que el circuito trabaja en sobre tensión cuando ( $VT > 1,10$  p.u) y en baja tensión cuando ( $VT < 0,9$  p.u) en un período mayor a 1 min.

Regulación: CREG-070-1998. Norma: IEEE Std 1159-1995.

**Distorsión armónica total (THD):** Se calcula como:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} V_k^2}}{V_{fund}} \quad (3)$$

donde:

THD: Distorsión armónica total (%); k: Orden del armónico;  $V_k$ : Tensión del armónico de orden superior k (V);  $V_{fund}$ : Tensión de la componente fundamental (V).

Se establece un límite de THD del 5% para redes de tensión menor a 69 kV. En caso de observarse valores por encima del límite establecido, se realiza un análisis estadístico.

Regulación: CREG-070-1998. Norma: IEEE Std 519-1993.

**Factor de potencia:** Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente o la relación entre energía activa y la energía aparente total.

Se establece que el factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones deberá ser igual o superior a punto noventa (0.90).

Regulación: CREG-047-2004.

**Comportamiento de la carga en el tiempo:** Es el valor de potencia demandada en cada instante de tiempo registrado.

**Factor de carga (FC):**

En el transformador es la relación porcentual entre la potencia medida en el circuito ( $kVA_{medido}$ ) y la potencia nominal del transformador ( $kVA_{nominal}$ ).

$$FC (\%) = \frac{kVA_{medido}}{kVA_{nominal}} \quad (4)$$

En el motor es la relación entre la potencia de salida estimada y la potencia nominal.

$$FC (\%) = \frac{kW_{estimado}}{kW_{nominal}} \quad (5)$$

#### **4.4. Resultados de las mediciones:**

##### ***4.4.1. CIRCUITO 1***

Subestación: 1.

Transformador: 1 000 kVA; 13,2kV  $\Delta$ /228/132V Y, 2532 A.

Equipo de medición: Analizador de redes Dranetz, clase A.

Circuito que alimenta: Motores y áreas que no incluyen a las mesas de carga.

Período de medición: (24/9-1/10).



Figura 5. Transformador 1 de la subestación 1.

### Resultados.

#### Desequilibrio de tensión (DT).

*Durante las mediciones realizadas se observó que las tensiones del circuito están equilibradas, pues los valores de DT estuvieron por debajo del 2%, valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

La figura 6 muestra los registros de las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ . La figura 7 muestra los registros de DT. En la tabla 8 se presentan los principales parámetros estadísticos del comportamiento de la variación de tensión.

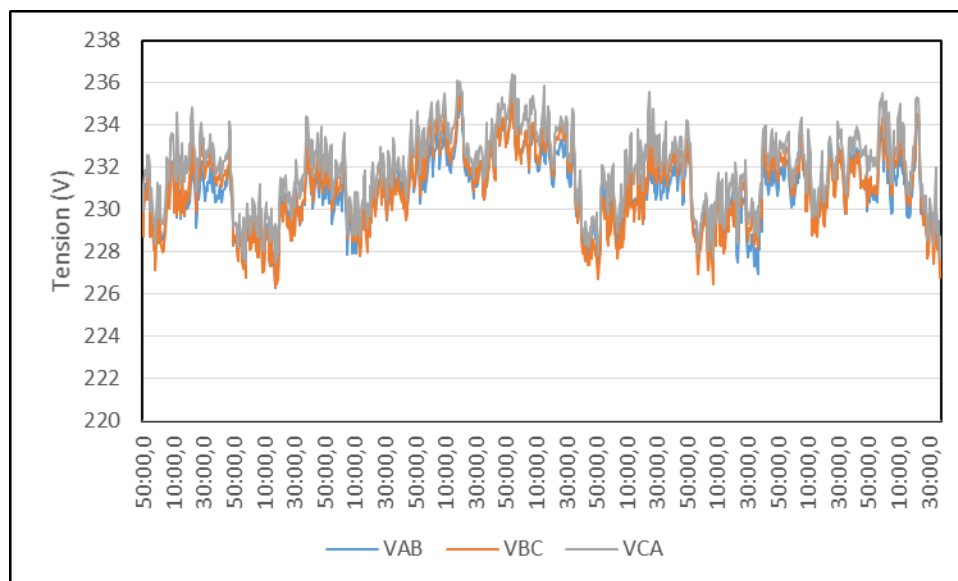


Figura 6. Registro de las tensiones de línea.

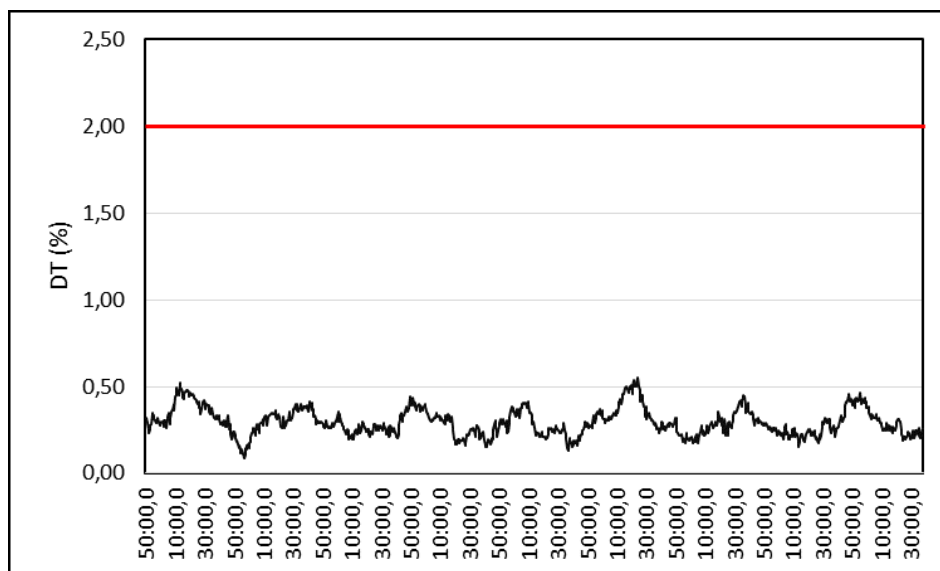


Figura 7. Registro del desequilibrio de tensión.

Tabla 8. Análisis estadístico de la variación de tensión.

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Desequilibrio de tensión	0,08	0,55	0,29	0,0788

### Variación de tensión (VT).

*Las mediciones muestran que la tensión de operación del circuito es adecuado, pues los valores de VT estuvieron dentro de los límites establecidos por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

En la figura 8 se muestra el comportamiento de la variación de tensión. En la tabla 9 se presentan los principales parámetros estadísticos de la variación de tensión.

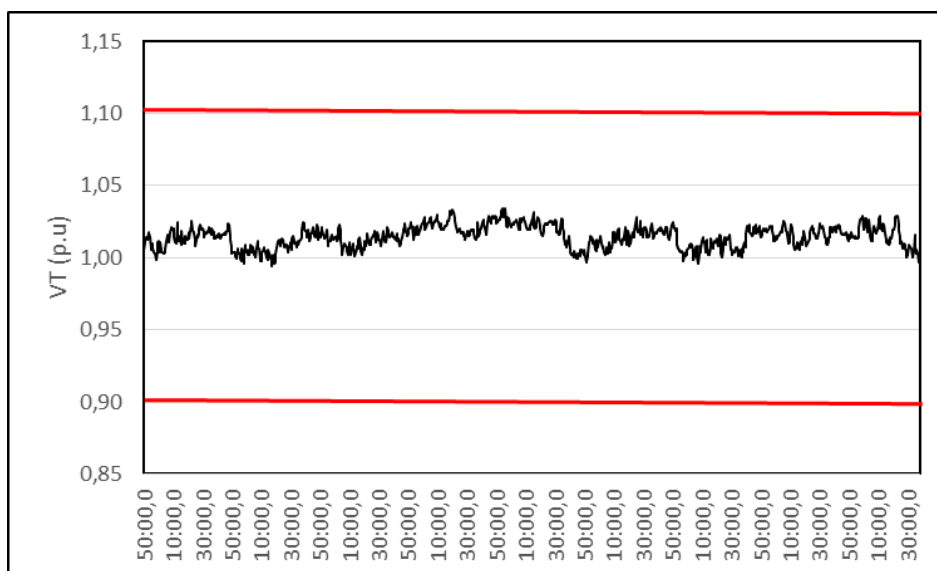


Figura 8. Registro de la variación de tensión.

Tabla 9. Análisis estadístico de la variación de tensión.

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Variación de tensión	0,99	1,03	1,01	0,0076

### Distorsión armónica total (THD).

*Las mediciones mostraron que no existen problemas de contaminación de armónicos, pues los valores de THD no superan el 5%, que es valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 519-1995.*

En la figura 9 se observa el comportamiento de THD en los registros realizados.

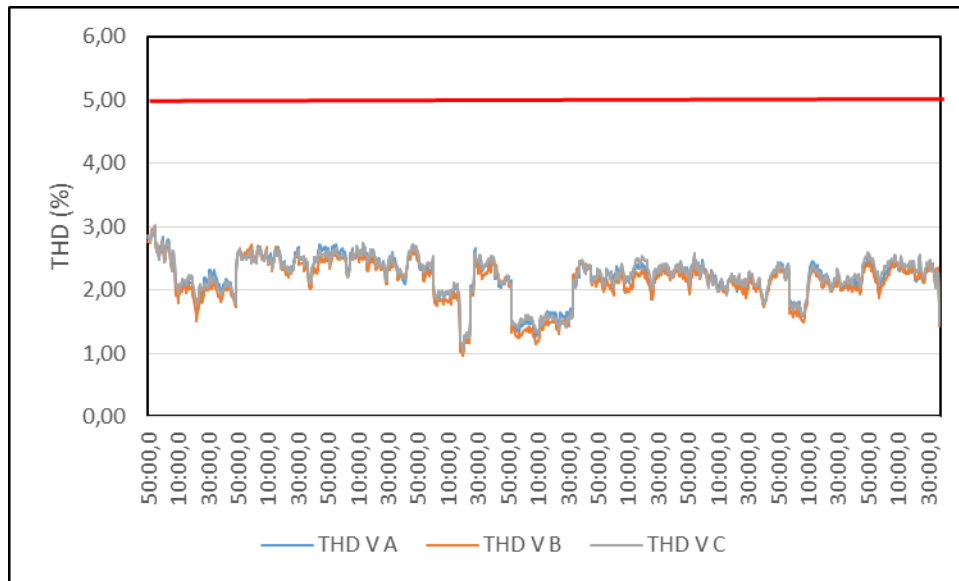


Figura 9. Registro de la distorsión armónica total de tensión.

En la tabla 10 se presentan los principales parámetros estadísticos de la variación de tensión.

Tabla 10. Análisis estadístico de la variación de tensión.

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Variación de tensión	0,99	1,03	1,01	0,0076

**Factor de potencia.**

*En las mediciones realizadas se observa que el factor de potencia es bajo, con valores inferiores a 0,9, límite establecido por la regulación CREG-047-2004.*

En la figura 10 se muestra el comportamiento del factor de potencia.

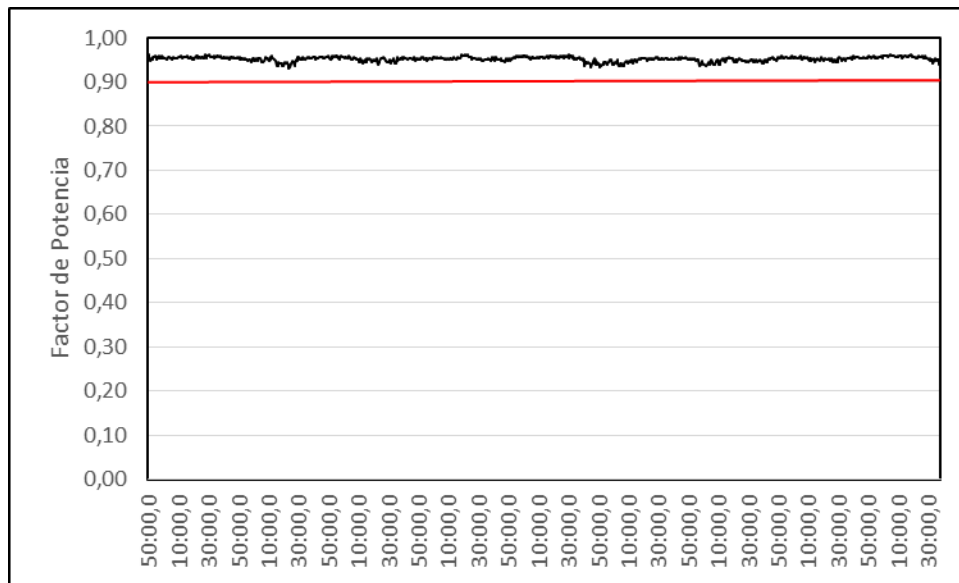


Figura 10. Registro del factor de potencia.

Tabla 11. Análisis estadístico de la variación de tensión.

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Factor de potencia	0,93	0,96	0,95	0,0053

### **Comportamiento de la carga en el tiempo:**

*El comportamiento de la carga es muy variable, lo que demuestra la variabilidad de la demanda en el proceso de carga de las baterías.*

En la figura 11 se observa el comportamiento de la carga en el tiempo. En la tabla 12 se muestran las principales variables estadísticas de las mediciones.



Figura 11. Comportamiento de la potencia.

Tabla 12. Variables estadísticas de la potencia de entrada.

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Potencia consumida	367,94	892,87	654,68	97,72

### Factor de carga del transformador (FC).

*El transformador se encuentra trabajando en condiciones de operación favorables pues su factor de carga es inferior al 40 %.*

En la figura 12 se observa el factor de carga del transformador. En la figura 13 se compara las corrientes de líneas registradas y la corriente nominal.

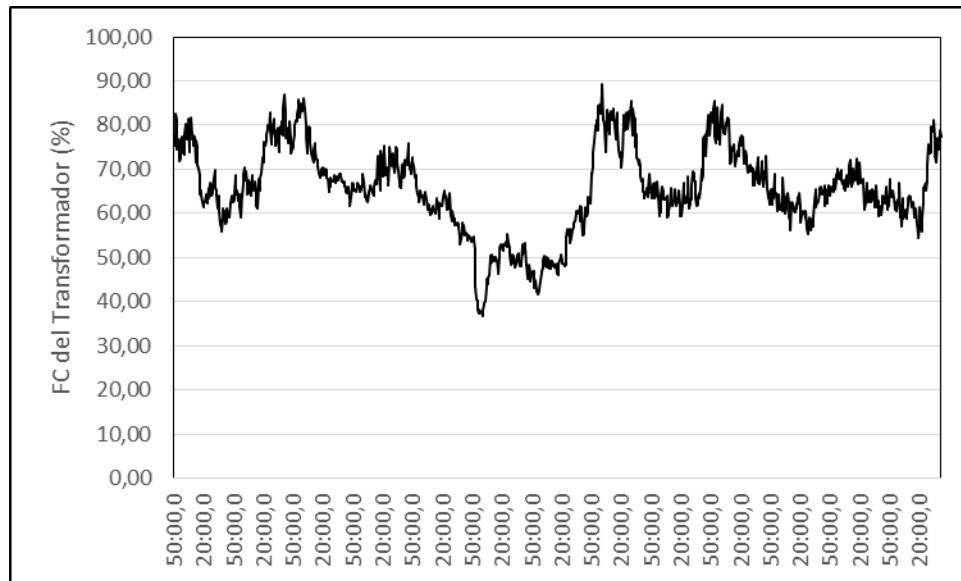


Figura 12. Factor de carga del transformador.

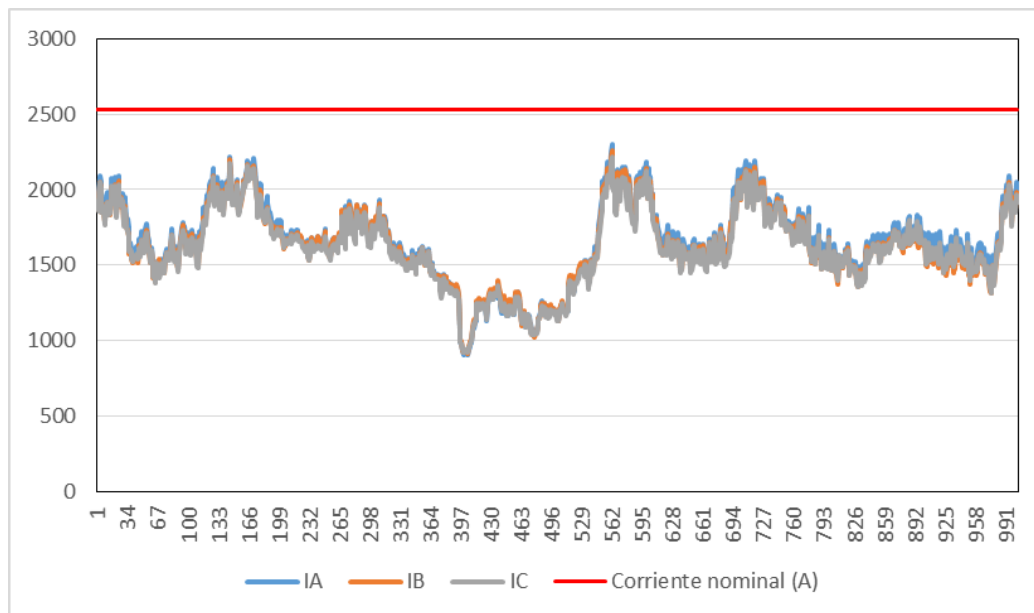


Figura 13. Comportamiento de la corriente demandada en relación a la corriente nominal del transformador.

#### 4.4.2. CIRCUITO 2.

Subestación: 2.

Transformador 1: 2 MVA; 13,2kV  $\Delta$ /282/163V Y.

Equipo de medición: Analizador de redes Dranetz, clase A.

Circuito que alimenta: Mesas de carga de baterías.

Período de medición: (1-16 de junio).



Figura 14. Transformador 1 de la subestación 2.

#### Resultados.

##### **Desequilibrio de tensión (DT).**

*Durante las mediciones realizadas se observó que las tensiones del circuito están equilibradas, pues los valores de DT estuvieron por debajo del 2%, valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

La figura 15 muestra los registros de las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ . La figura 16 muestra los registros de DT.



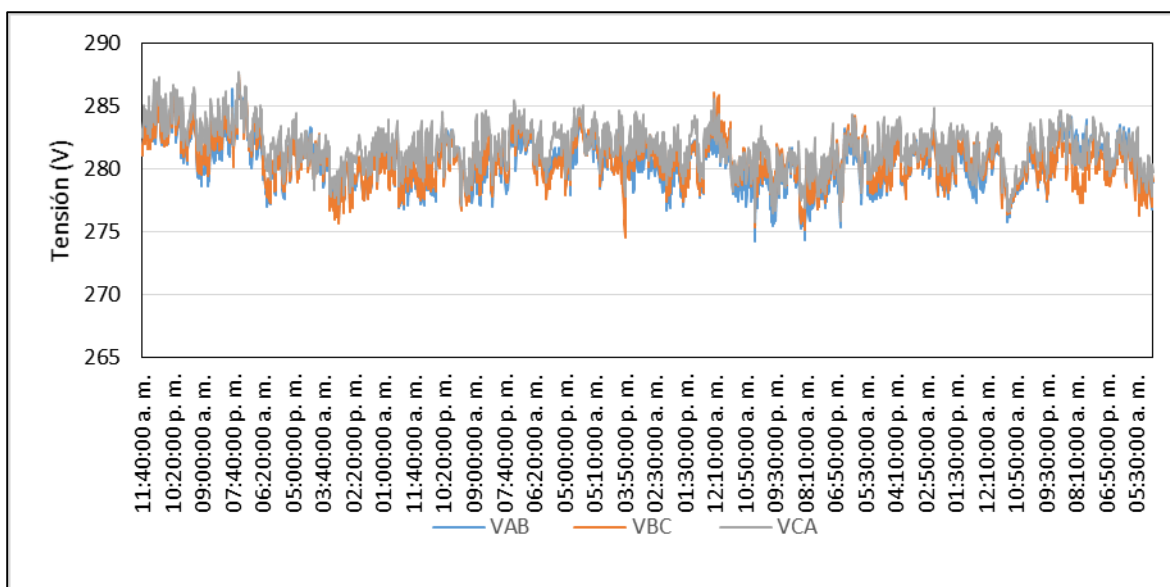


Figura 15. Registro de las tensiones de línea.

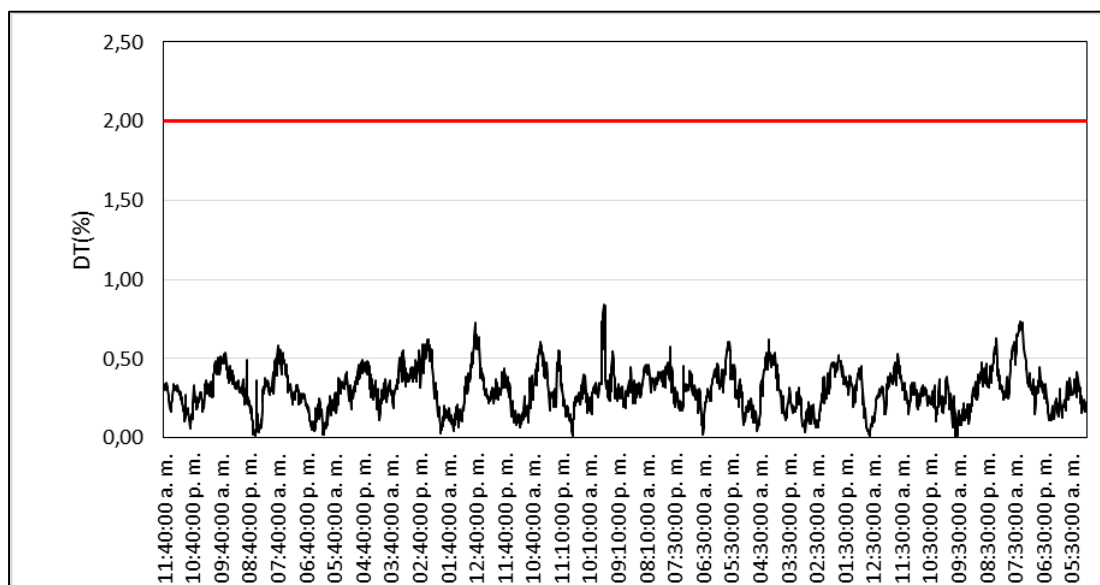


Figura 16. Registro del desequilibrio de tensión.

### Variación de tensión (VT).

*Las mediciones muestran que la tensión de operación del circuito es adecuado, pues los valores de VT estuvieron dentro de los límites establecidos por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

En la figura 17 se muestra el comportamiento de la variación de tensión.

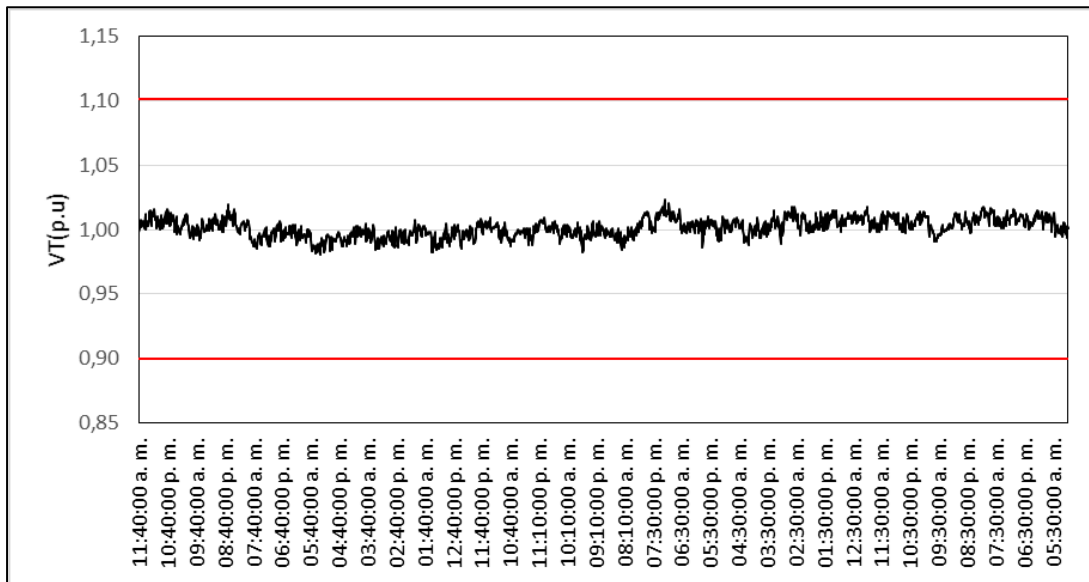


Figura 17. Registro de la variación de tensión.

### Distorsión armónica total (THD).

*Las mediciones mostraron que existen problemas de contaminación de armónicos, pues los valores de THD superan el 5%, que es valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 519-1995.*

En la figura 18 se observa el comportamiento de THD en los registros realizados. En la tabla 13 se muestran los resultados de los análisis estadísticos.

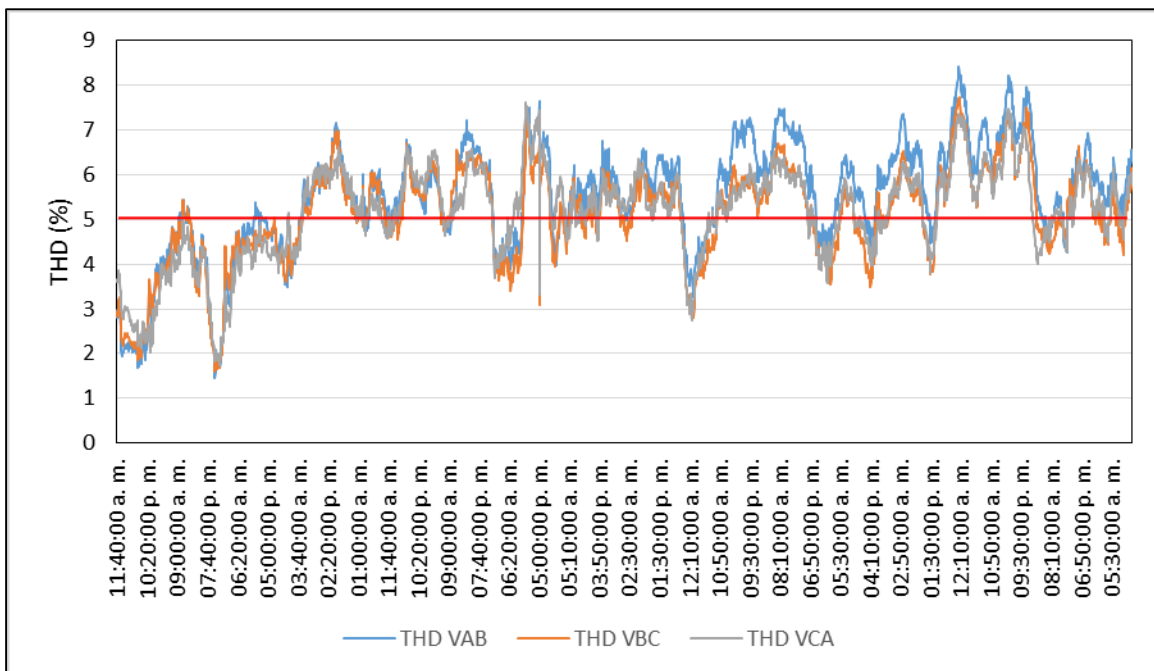


Figura 18. Registro de la distorsión armónica total de tensión.

Tabla 13. Análisis estadístico de las mediciones.

THD	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Por ciento de registros por encima del 5%
V <sub>AB</sub>	8,42	1,46	5,50	5,66	1,24	52,87
V <sub>BC</sub>	7,73	1,60	5,12	5,25	1,08	58,40
V <sub>CA</sub>	7,61	1,72	5,15	5,30	1,05	62,62

### **Factor de potencia.**

*En las mediciones realizadas se observa que el factor de potencia es bajo, con valores inferiores a 0,9, límite establecido por la regulación CREG-047-2004.*

En la figura 19 se muestra el comportamiento del factor de potencia.

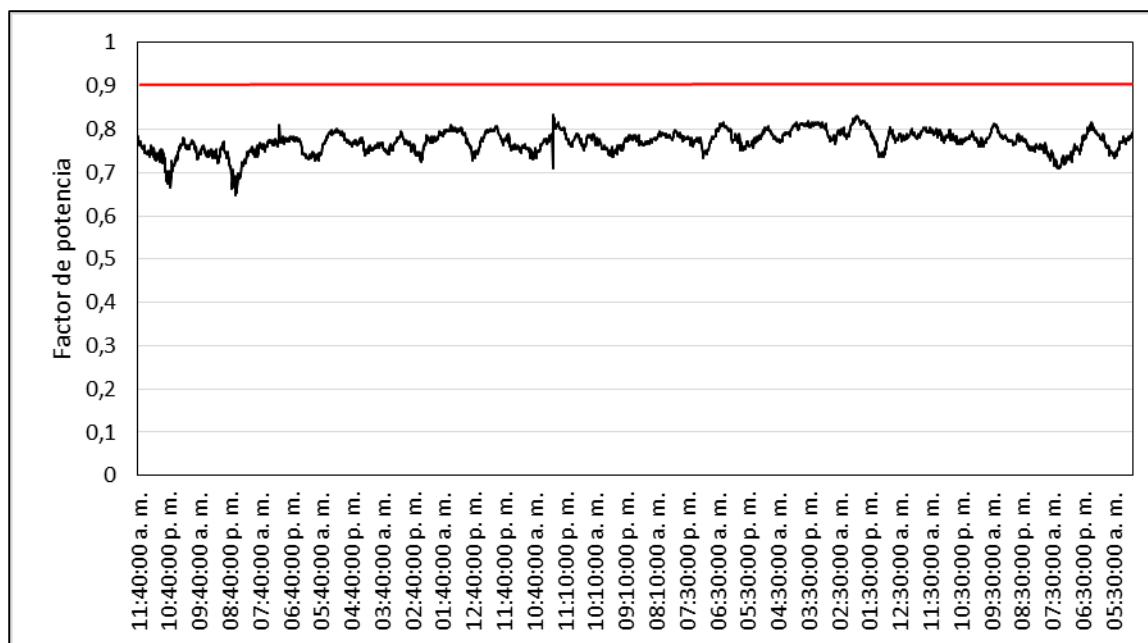


Figura 19. Registro del factor de potencia.

### **Comportamiento de la carga en el tiempo:**

*El comportamiento de la carga es muy variable, lo que demuestra la variabilidad de la demanda en el proceso de carga de las baterías.*

En la figura 20 se observa el comportamiento de la carga en el tiempo. En la tabla 14 se muestran las principales variables estadísticas de las mediciones.

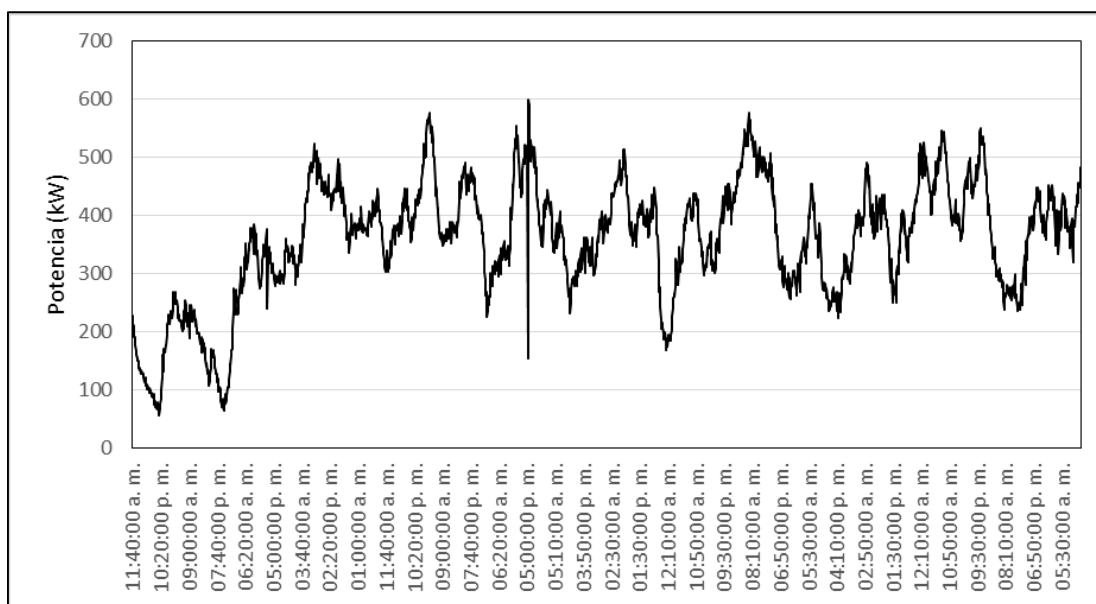


Figura 20. Comportamiento de la potencia.

Tabla 14. Variables estadísticas del comportamiento de la potencia.

Potencia Máxima (kW)	Potencia Mínima (kW)	Potencia Promedio (kW)	Desviación estándar (kW)
598,80	55,48	359,25	102,38

### **Factor de carga del transformador (FC).**

*El transformador se encuentra trabajando en condiciones de operación favorables pues su factor de carga es inferior al 40 %.*

En la figura 21 se observa el factor de carga del transformador.

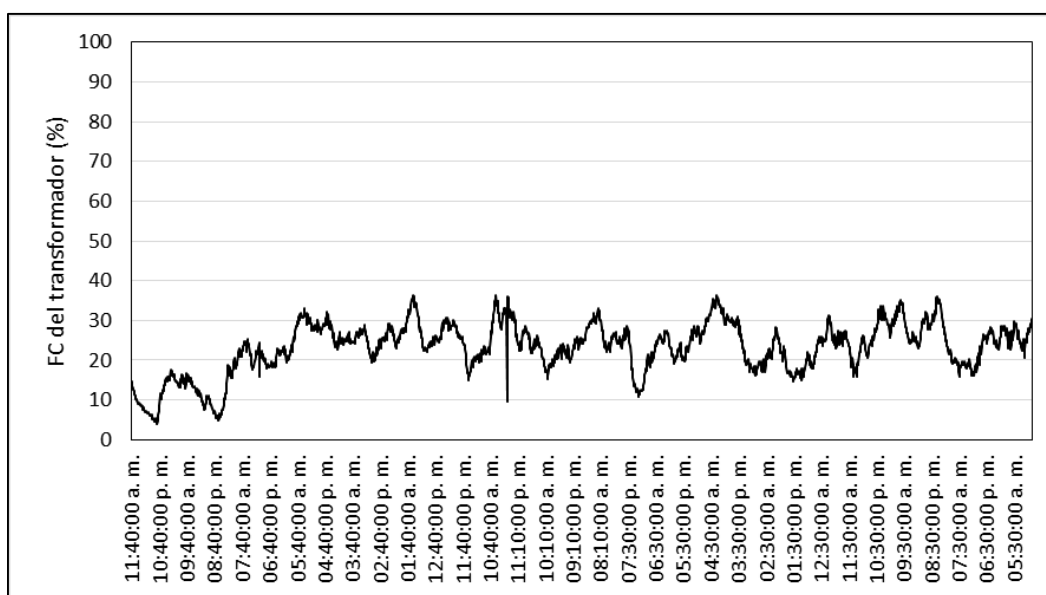


Figura 21. Factor de carga del transformador.

### Recomendaciones.

1. Realizar un estudio para la colocación de filtros que disminuyan el nivel de armónicos hasta los valores permitidos.
2. Analizar el efecto del bajo factor de potencia en el circuito de la empresa.

#### **4.4.3. CIRCUITO 3.**

Subestación: 2.

Transformador 2: 800 kVA; 13,2kV  $\Delta$ /266/154Y

Equipo de medición: Analizador de redes Fluke, clase A.

Circuito que alimenta: Mesas de carga de baterías.

Tiempo de medición: (1-16 de junio).



Figura 22. Transformador 2 de la subestación 2.

### Resultados.

#### **Desequilibrio de tensión (DT).**

*Durante las mediciones realizadas se observó que las tensiones del circuito están equilibradas, pues los valores de DT estuvieron por debajo del 2%, valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

La figura 23 muestra los registros de las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ . La figura 24 muestra los registros de DT.

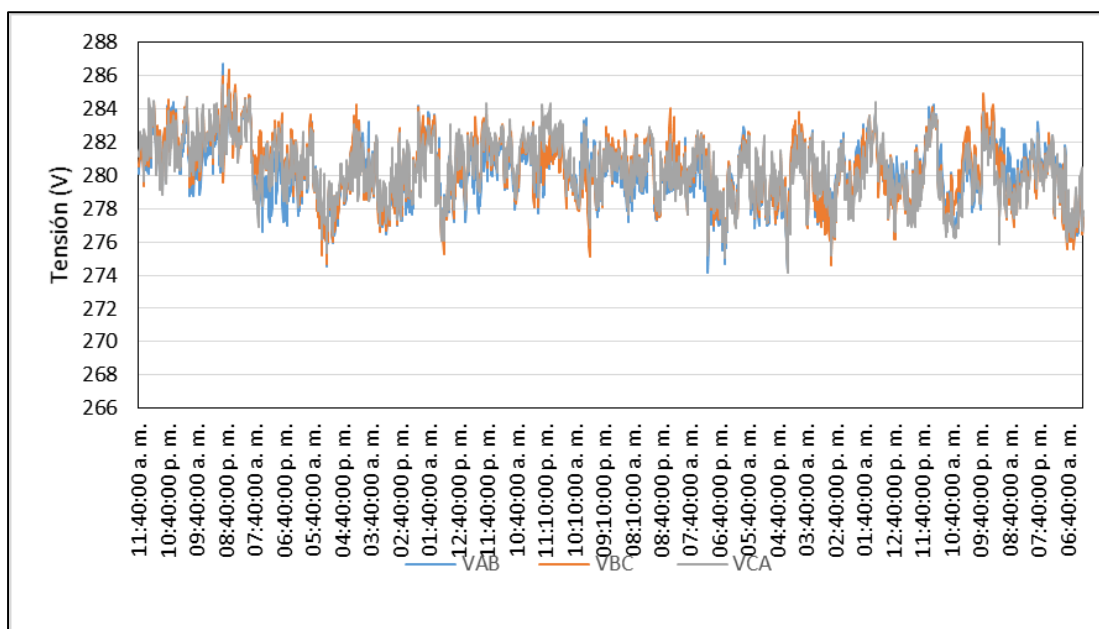


Figura 23. Registro de las tensiones de línea.

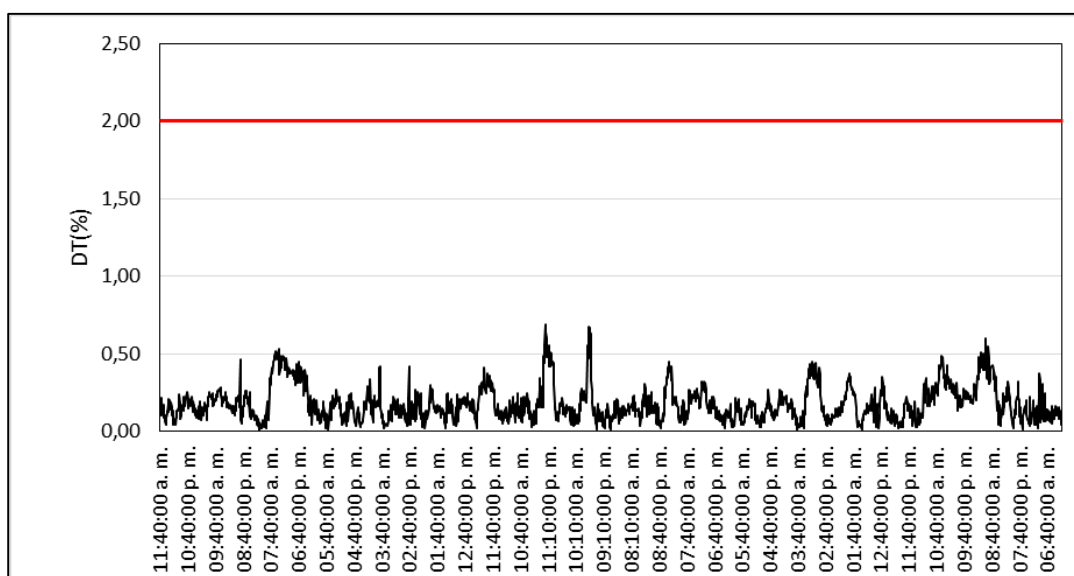


Figura 24. Registro del desequilibrio de tensión.

### **Variación de tensión (VT).**

*Las mediciones muestran que la tensión de operación del circuito es adecuado, pues los valores de VT estuvieron dentro de los límites establecidos por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

En la figura 25 se muestra el comportamiento de la variación de tensión.

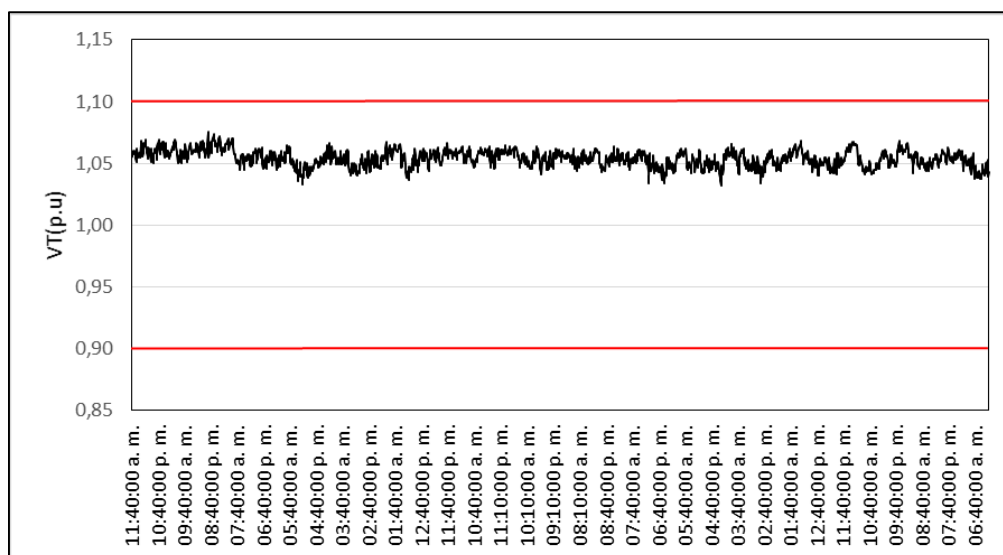


Figura 25. Registro de la variación de tensión.

### **Distorsión armónica total (THD).**

*Las mediciones mostraron que no existen problemas de contaminación de armónicos, pues los valores de THD fueron inferiores al 5%, que es valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 519-1995.*

En la figura 26 se observa el comportamiento de THD durante los registros.

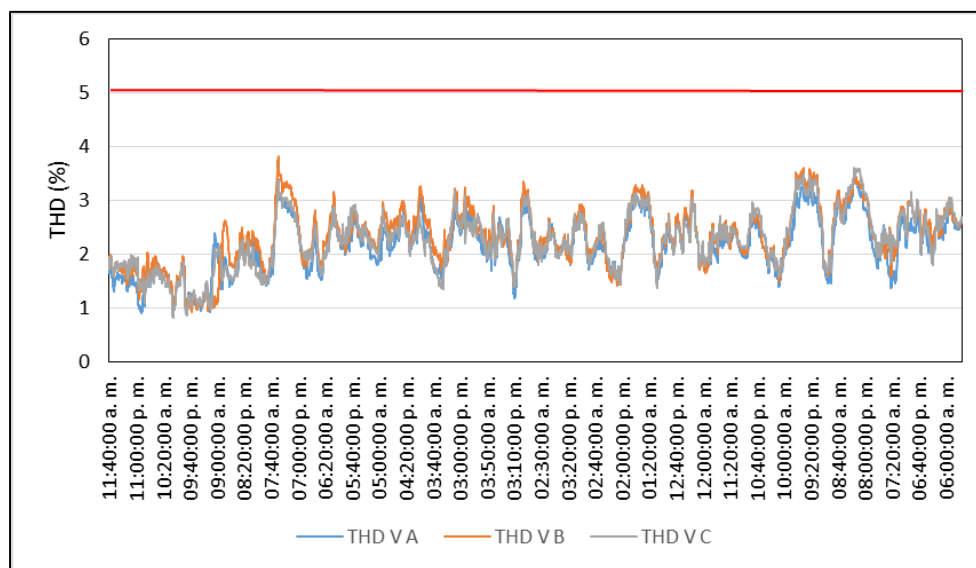


Figura 26. Registro de la distorsión armónica total de tensión.

### **Factor de potencia:**

*En las mediciones realizadas se observa que el factor de potencia es bajo, con valores inferiores a 0,9, límite establecido por la regulación CREG-047-2004.*

En la figura 27 se muestra el comportamiento del factor de potencia.

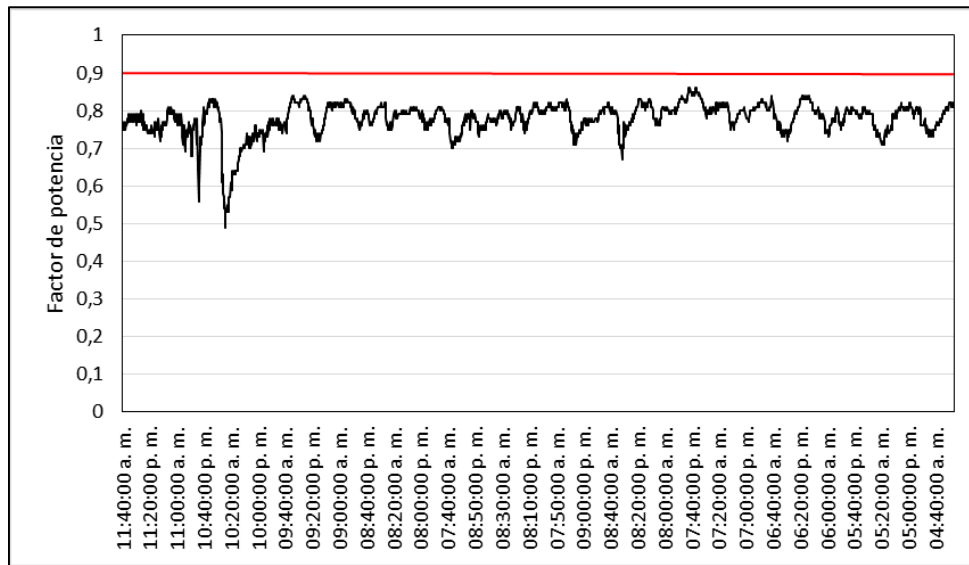


Figura 27. Registro del factor de potencia.

### Comportamiento de la carga en el tiempo:

*El comportamiento de la carga es muy variable, lo que demuestra la variabilidad de la demanda en el proceso de carga de las baterías.*

En la figura 28 se observa el comportamiento de la carga en el tiempo. En la tabla 15 se muestran las principales variables estadísticas de las mediciones.

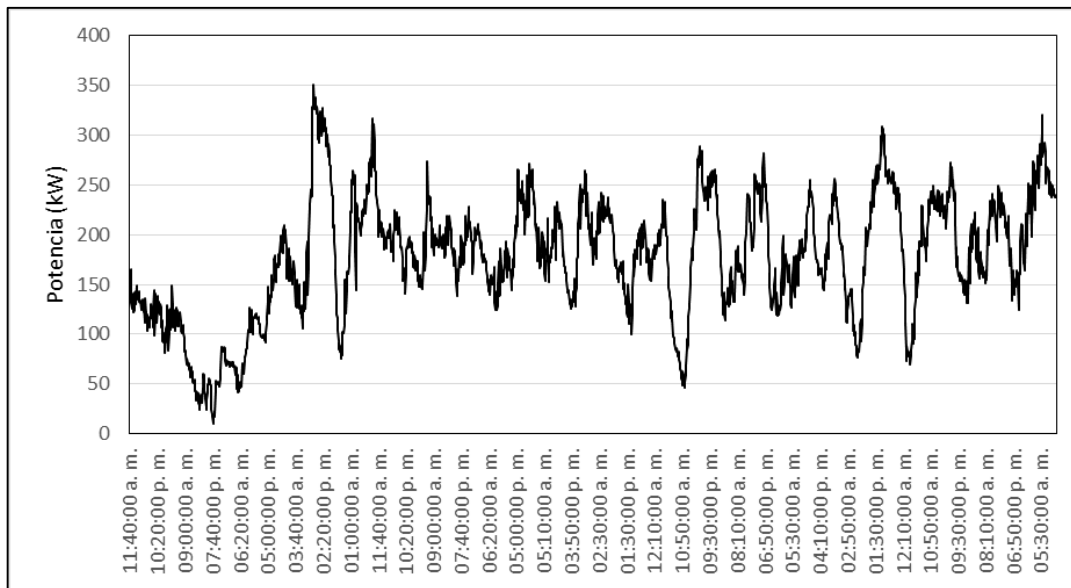


Figura 28. Comportamiento de la potencia.

Tabla 15. Variables estadísticas del comportamiento de la potencia.

Potencia Máxima (kW)	Potencia Mínima (kW)	Potencia Promedio (kW)	Desviación estándar (kW)
351,20	9,68	177,28	60,66



### Factor de carga del transformador (FC).

*El transformador se encuentra trabajando en condiciones de operación favorables pues su factor de carga es inferior al 60 %.*

En la figura 29 se observa el factor de carga del transformador.

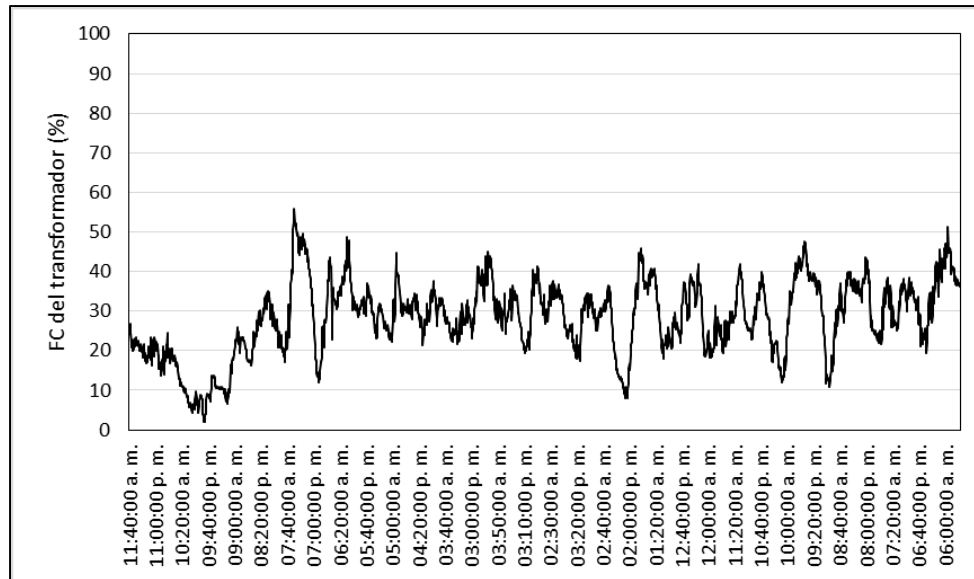


Figura 29. Factor de carga del transformador.

### Recomendaciones generales.

1. Analizar el efecto del bajo factor de potencia en el circuito de la fábrica.

#### 4.4.4. CIRCUITO 4.

Pizarra de distribución: 220 V, 3Φ.

Equipo de medición: Analizador de redes Dranetz, clase A.

Circuito que alimenta: Área administrativa.

Tiempo de medición: (16-19 de junio).



Figura 30. Pizarra del área administrativa.

## Resultados.

### **Desequilibrio de tensión (DT).**

*Durante las mediciones realizadas se observó que las tensiones del circuito están equilibradas, pues los valores de DT estuvieron por debajo del 2%, valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

*Se observa además una variación cíclica de la tensión debido a la variación de la carga. Esto se muestra más adelante en el análisis de la variación de la carga.*

La figura 31 muestra los registros de las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ . La figura 32 muestra los registros de DT.

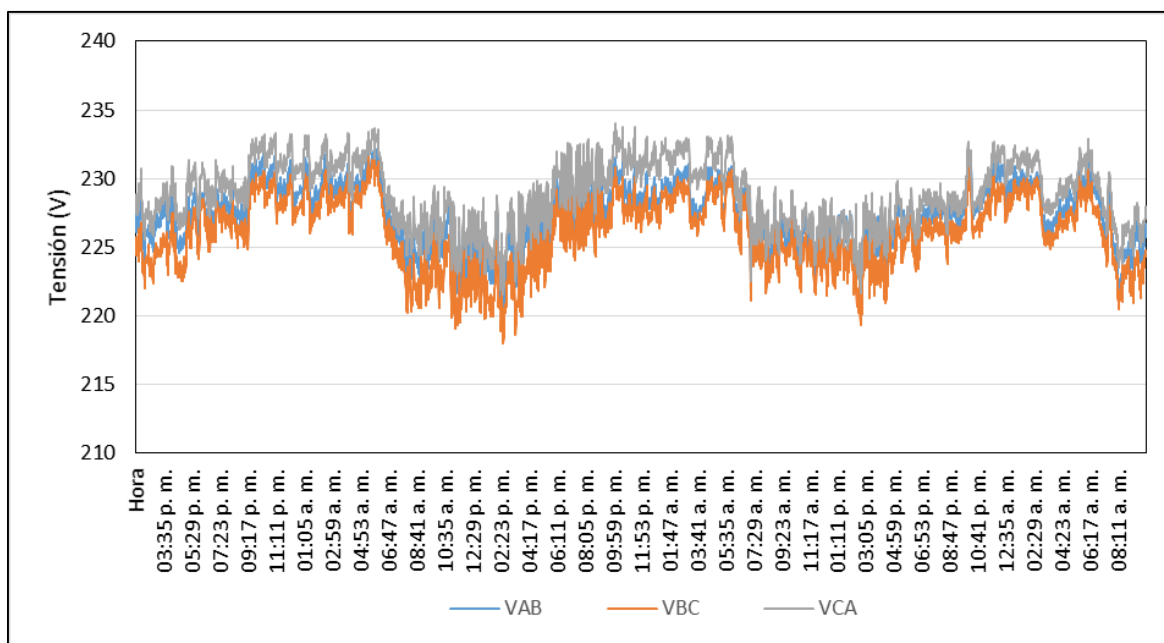


Figura 31. Registro de las tensiones de línea.

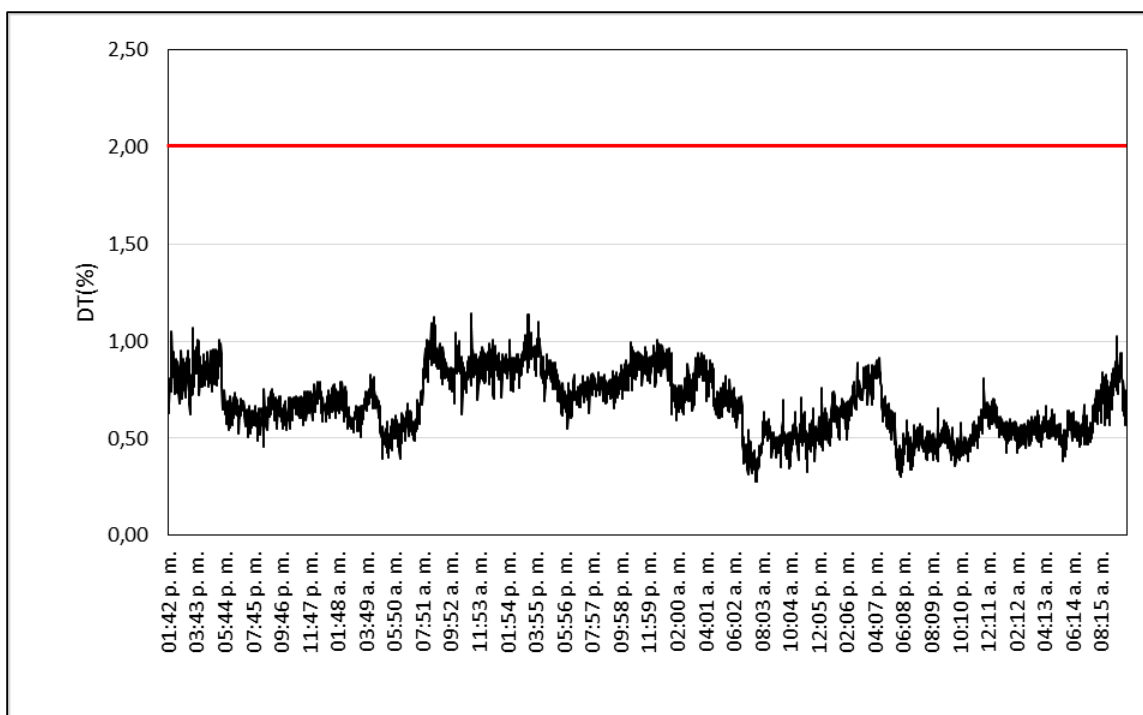


Figura 32. Registro del desequilibrio de tensión.

### Variación de tensión (VT).

*Las mediciones muestran que la tensión de operación del circuito es adecuado, pues los valores de VT estuvieron dentro de los límites establecidos por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

En la figura 33 se muestra el comportamiento de la variación de tensión.

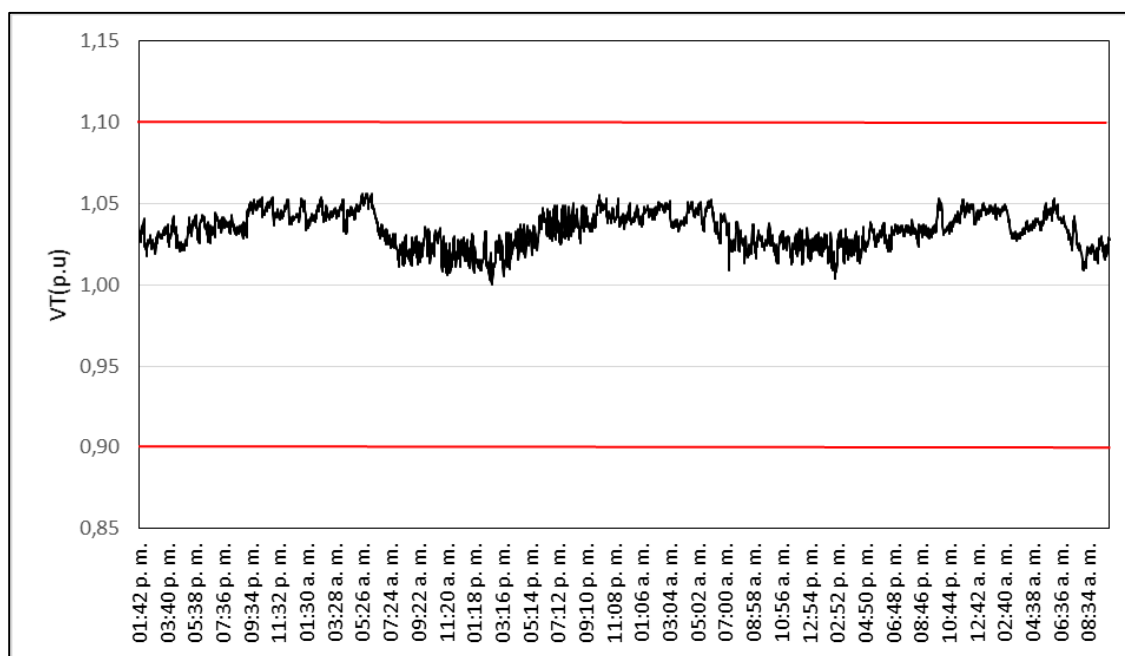


Figura 33. Registro de la variación de tensión.

### **Distorsión armónica total (THD).**

*Las mediciones mostraron que no existen problemas de contaminación de armónicos, pues los valores de THD fueron inferiores al 5%, que es valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 519-1995.*

En la figura 34 se observa el comportamiento de THD durante los registros.

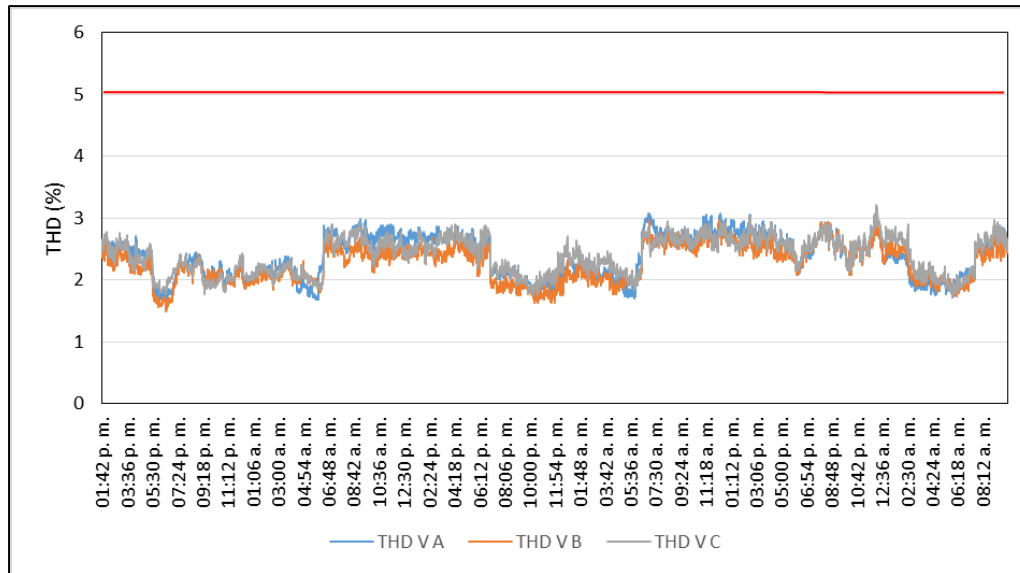


Figura 34. Registro de la distorsión armónica total de tensión.

### **Factor de potencia.**

*En las mediciones realizadas se observa que el factor de potencia presenta un buen comportamiento, pues los valores superan a 0,9, límite establecido por la regulación CREG-047-2004.*

En la figura 35 se muestra el comportamiento del factor de potencia.

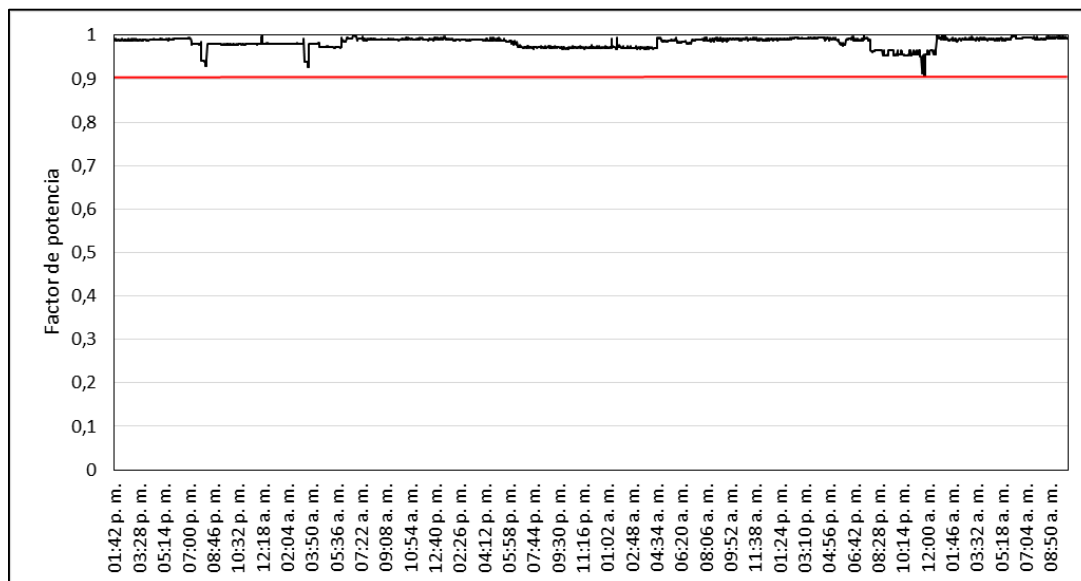


Figura 35. Registro del factor de potencia.

### Comportamiento de la carga en el tiempo:

*El comportamiento de la carga es cíclico, acorde con la jornada de trabajo. Su comportamiento incide directamente en la fluctuación de la tensión observada en la Figura 22.*

En la figura 36 se observa el comportamiento de la carga en el tiempo. En la figura 37 se muestran los registros de la carga y la tensión conjuntamente, observándose que el comportamiento cíclico de la potencia y la tensión son inversamente proporcionales. En la tabla 16 se muestran las principales variables estadísticas de las mediciones.

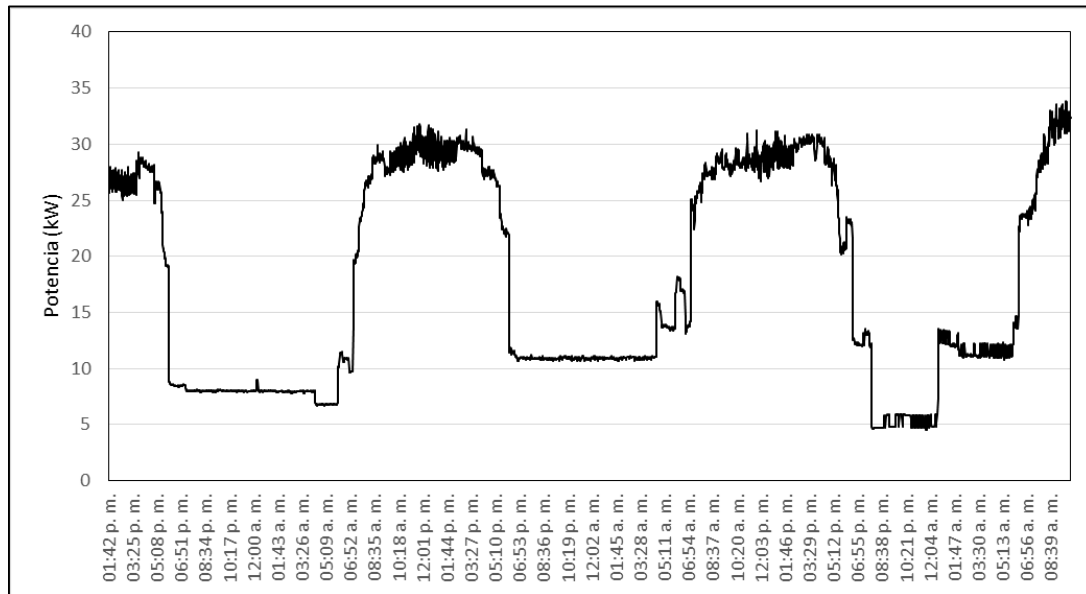


Figura 36. Comportamiento de la potencia.

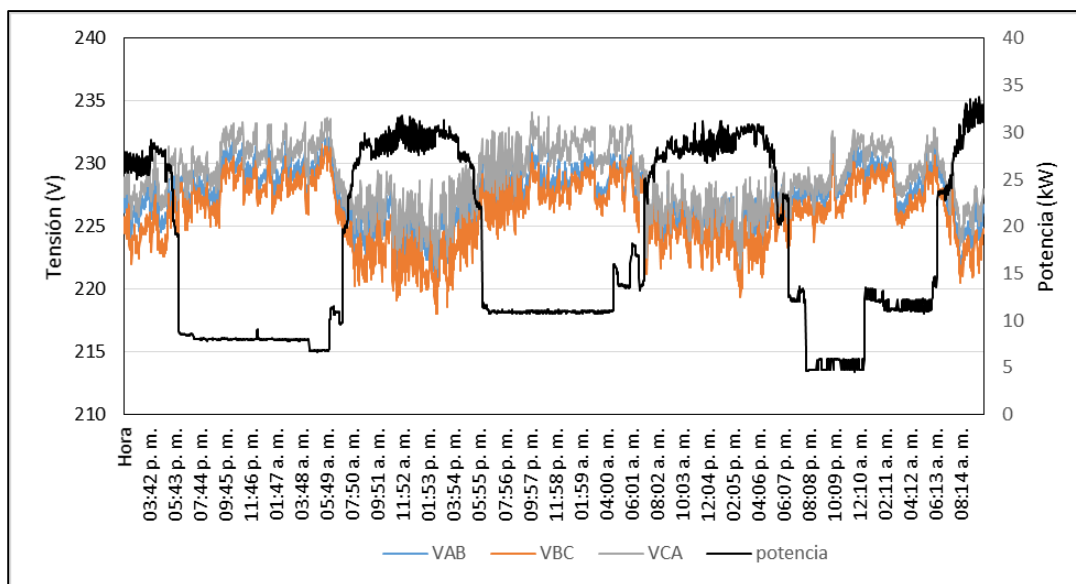


Figura 37. Registro de la potencia y las tensiones.

Tabla 16. Variables estadísticas del comportamiento de la potencia.

Potencia Máxima (kW)	Potencia Mínima (kW)	Potencia Promedio (kW)	Desviación Estándar (kW)
33,84	4,57	17,79	9,35

#### Recomendaciones.

1. No se observó ninguna anomalía.

#### 4.4.5. CIRCUITO 5.

Pizarra de distribución: 220 V, 3 $\Phi$ .

Equipo de medición: Analizador de redes Fluke, clase A.

Circuito que alimenta: Área de los compresores.

Tiempo de medición: (16-24 de junio).

Tabla 17. Datos de los motores de los compresores.

Fabricante	Kaeser Compressors
Cantidad	4
Potencia	40 HP,
Voltaje	230 V
Velocidad	3570 rpm
Corriente	12,8 A
Máxima presión de trabajo	16 bar, 230 psig



Figura 38. Área de compresores.

#### Resultados.

#### Desequilibrio de tensión (DT).

*Durante las mediciones realizadas se observó que las tensiones del circuito están equilibradas, pues los valores de DT estuvieron por debajo del 2%, valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

*Se observa además una variación cíclica de la tensión debido a la variación de la carga.*

La figura 39 muestra los registros de las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ . La figura 40 muestra los registros de DT.

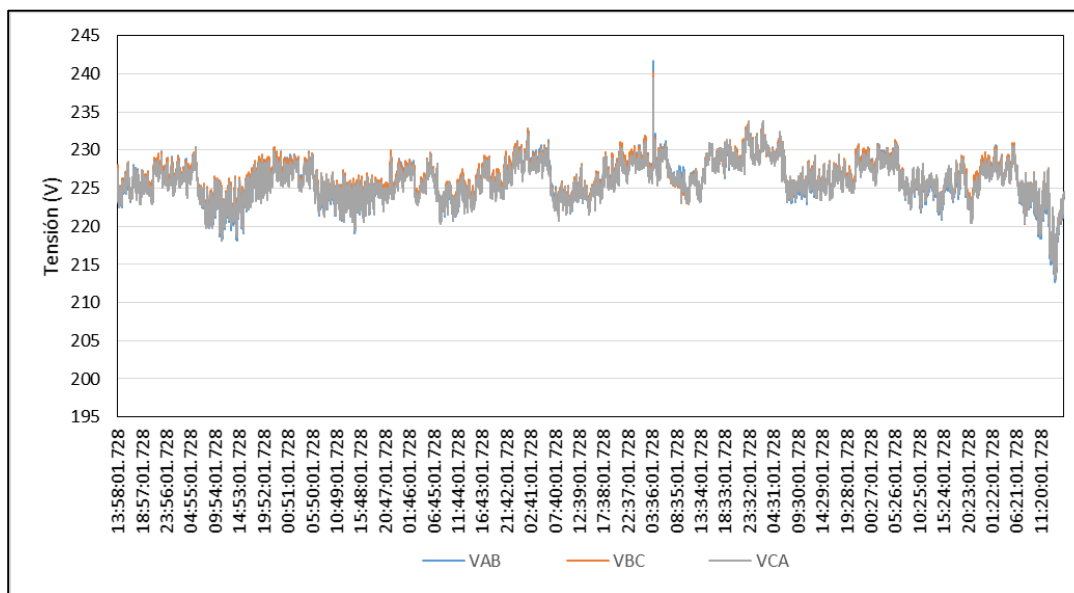


Figura 39. Registro de las tensiones de línea.

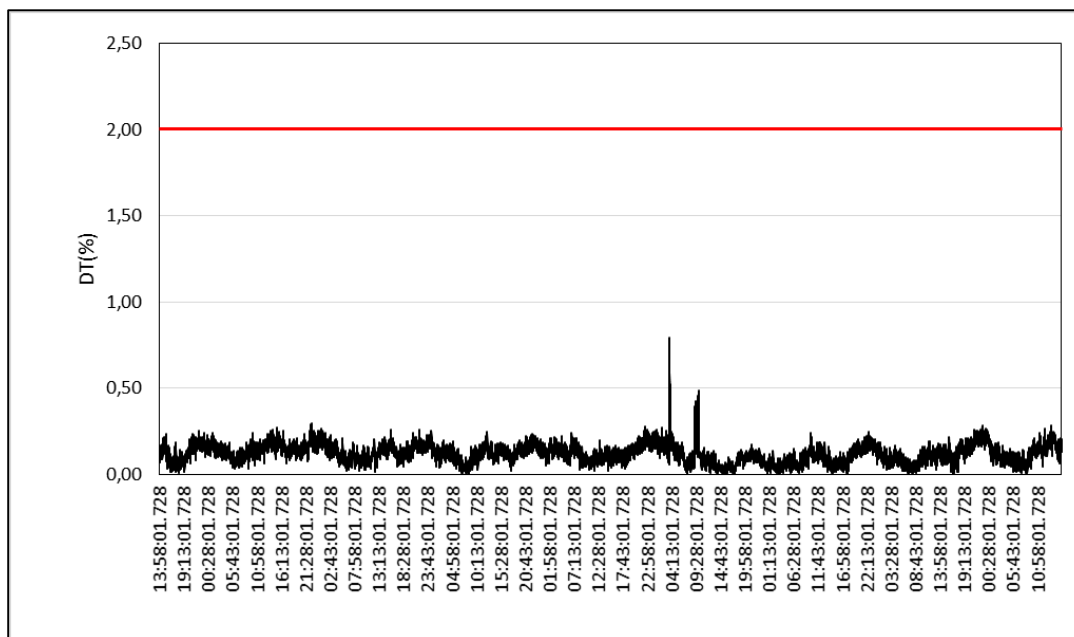


Figura 40. Registro del desequilibrio de tensión.

### **Variación de tensión (VT).**

*Las mediciones muestran que la tensión de operación del circuito es adecuado, pues los valores de VT estuvieron dentro de los límites establecidos por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

En la figura 41 se muestra el comportamiento de la variación de tensión.

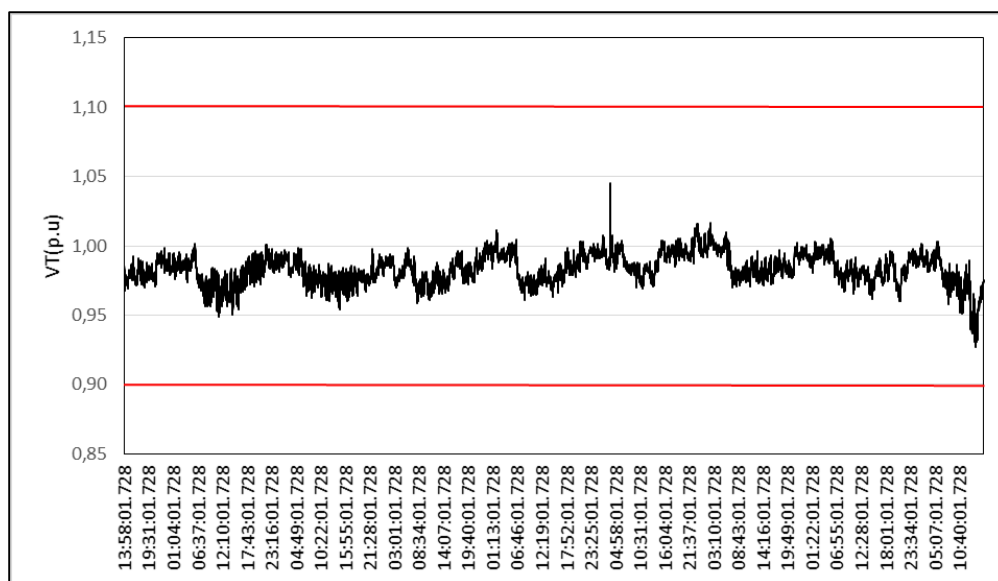


Figura 41. Registro de la variación de tensión.

### **Distorsión armónica total (THD).**

*Las mediciones mostraron que no existen problemas de contaminación de armónicos, pues los valores de THD fueron inferiores al 5%, que es valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 519-1995.*

En la figura 42 se observa el comportamiento de THD durante los registros.

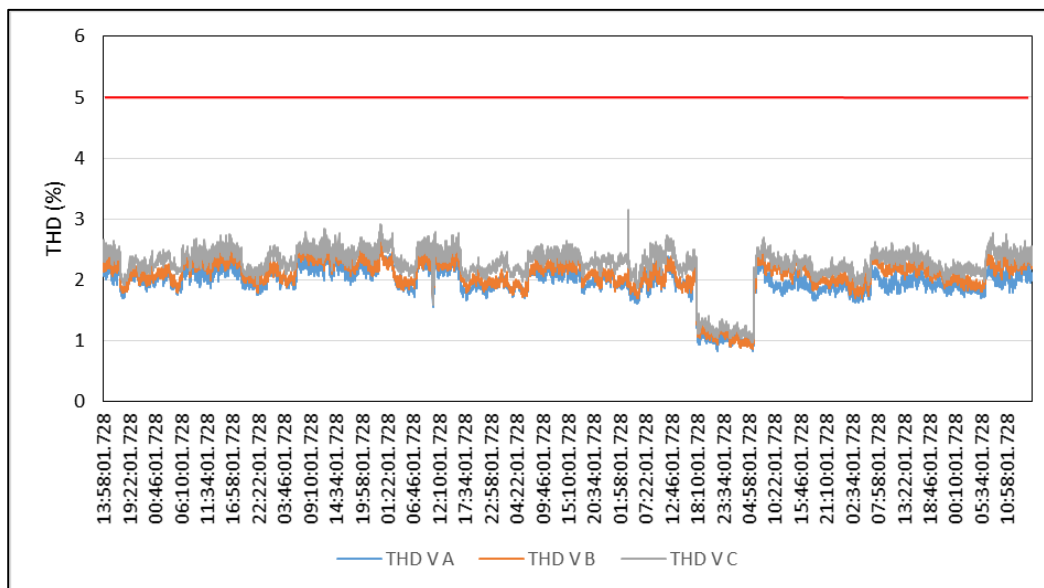


Figura 42. Registro de la distorsión armónica total de tensión.

### **Factor de potencia.**

*En las mediciones realizadas se observa que el factor de potencia presenta un buen comportamiento, pues los valores superan a 0,9, límite establecido por la regulación CREG-047-2004.*

En la figura 43 se muestra el comportamiento del factor de potencia.



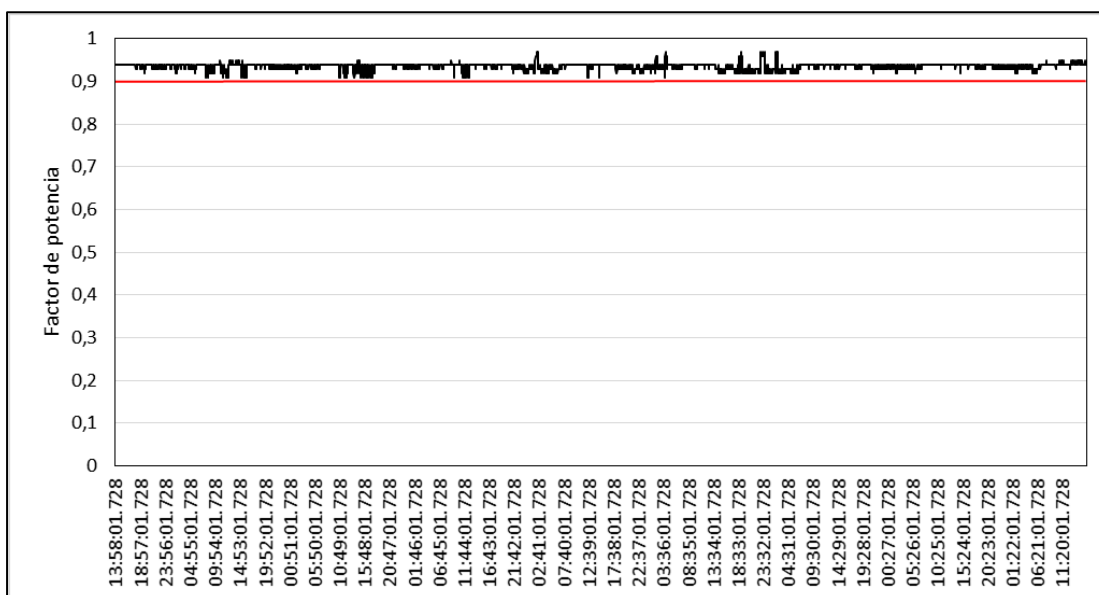


Figura 43. Registro del factor de potencia.

### **Comportamiento de la carga en el tiempo:**

*El comportamiento de la carga es cíclico, según la demanda del aire comprimido. Sin embargo, no se producen procesos de parada en los compresores, lo que evidencia una posible sobrecarga del sistema. Esto será estudiado detalladamente en las próximas etapas del proyecto.*

En la figura 44 se observa el comportamiento de la carga en el tiempo. En la tabla 18 se muestra las principales variables estadísticas de las mediciones.

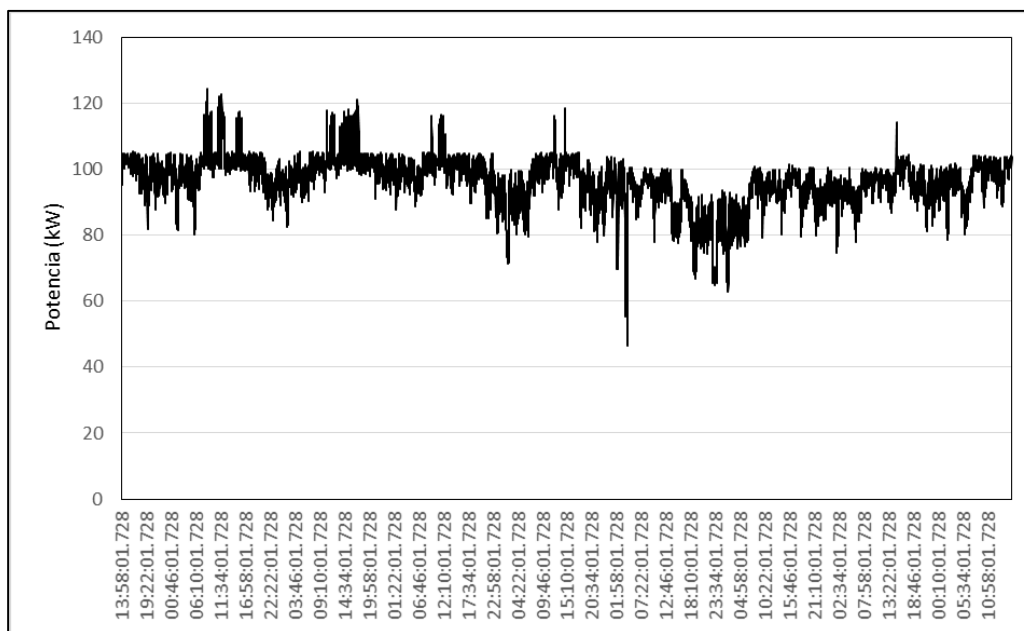


Figura 44. Comportamiento de la potencia.

Tabla 18. Variables estadísticas del comportamiento de la potencia.

Potencia Máxima (kW)	Potencia Mínima (kW)	Potencia Promedio (kW)	Desviación Estándar (kW)
124,46	46,46	96,37	7,53

Recomendaciones.

1. Estudiar en las próximas etapas el sistema de generación, distribución y consumo del aire comprimido de la empresa.

4.4.6. *CIRCUITO 6.*

Pizarra de distribución: 230 V, 3 $\Phi$ .

Equipo de medición: Analizador de redes Fluke, clase A.

Circuito que alimenta: Motor de colector de polvo 1.

Tiempo de medición: (24 de junio-2 de julio).

Tabla 19. Datos nominales del motor del colector de polvo 1.

Marca	Baldor
Función	Colector de polvo 1
Potencia	60 HP; 44,76 kW
Tensión	230 V
Corriente	138 A
Velocidad	1770 rpm
Factor de potencia	0,86
Eficiencia	93,6

El motor se alimenta a través de un variador de frecuencia.



Figura 45. Motor del colector de polvo 1.

## Resultados.

### Desequilibrio de tensión (DT).

*Durante las mediciones realizadas se observó que las tensiones del circuito están equilibradas, pues los valores de DT estuvieron por debajo del 2%, valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

*Se observa además una variación cíclica de la tensión debido a la variación de la carga en la empresa.*

La figura 46 muestra los registros de las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ . La figura 47 muestra los registros de DT.

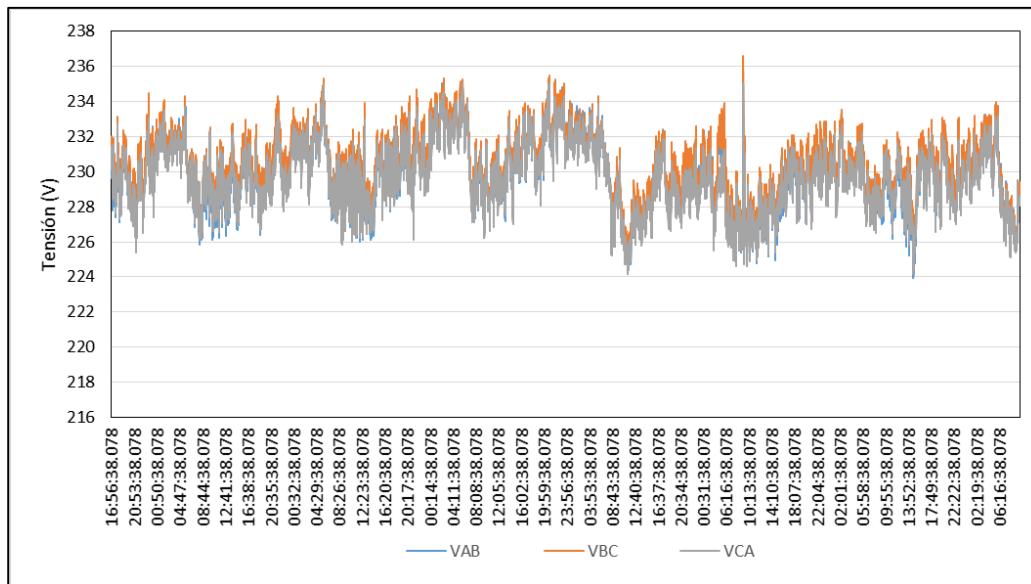


Figura 46. Registro de las tensiones de línea.

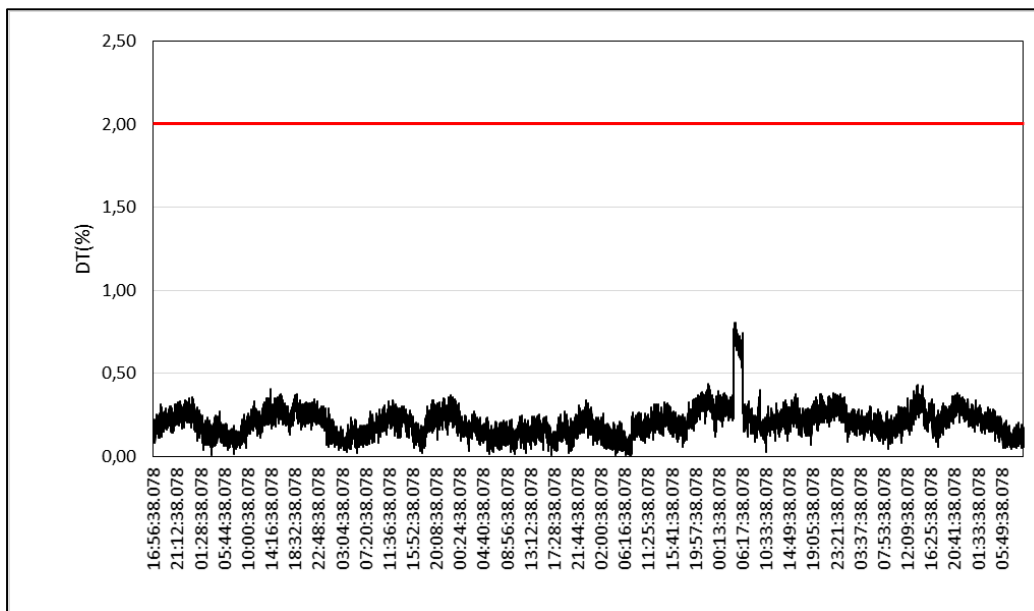


Figura 47. Registro del desequilibrio de tensión.

### **Variación de tensión (VT).**

*Las mediciones muestran que la tensión de operación del circuito es adecuado, pues los valores de VT estuvieron dentro de los límites establecidos por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

En la figura 48 se muestra el comportamiento de la variación de tensión.

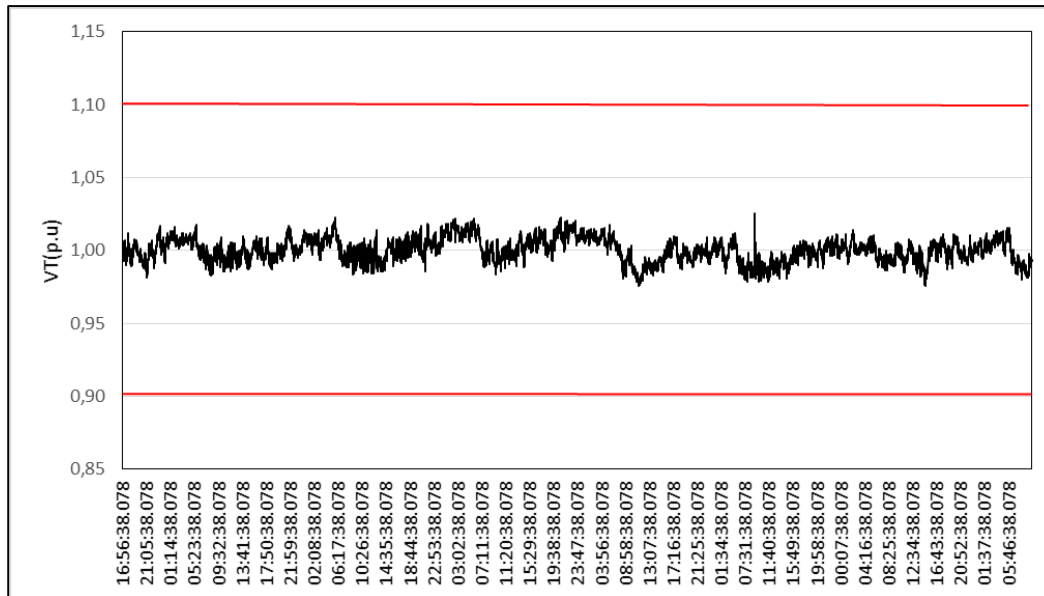


Figura 48. Registro de la variación de tensión.

### **Distorsión armónica total (THD).**

*Las mediciones mostraron que existen problemas de contaminación de armónicos, pues los valores de THD superan el 5%, que es valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 519-1995. Estos altos niveles de armónicos son generador por el variador de frecuencia.*

En la figura 49 se observa el comportamiento de THD en los registros realizados. En la tabla 20 se muestran los resultados de los análisis estadísticos.

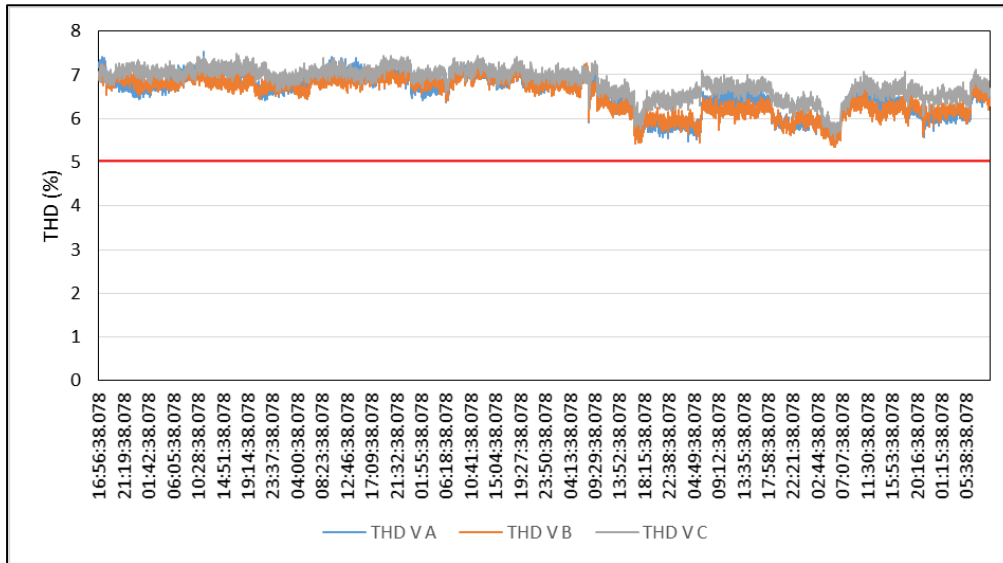


Figura 49. Registro de la distorsión armónica total de tensión.

Tabla 20. Análisis estadístico de las mediciones.

THD	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Por ciento de registros por encima del 5%
V <sub>AB</sub>	7,52	5,47	6,58	6,67	0,44	100
V <sub>BC</sub>	7,27	5,34	6,53	6,69	0,41	100
V <sub>CA</sub>	7,49	5,52	6,82	6,91	0,33	100

### Factor de potencia.

*En las mediciones realizadas se observa que el factor de potencia es bajo, con valores inferiores a 0,9, límite establecido por la regulación CREG-047-2004.*

En la figura 50 se muestra el comportamiento del factor de potencia.

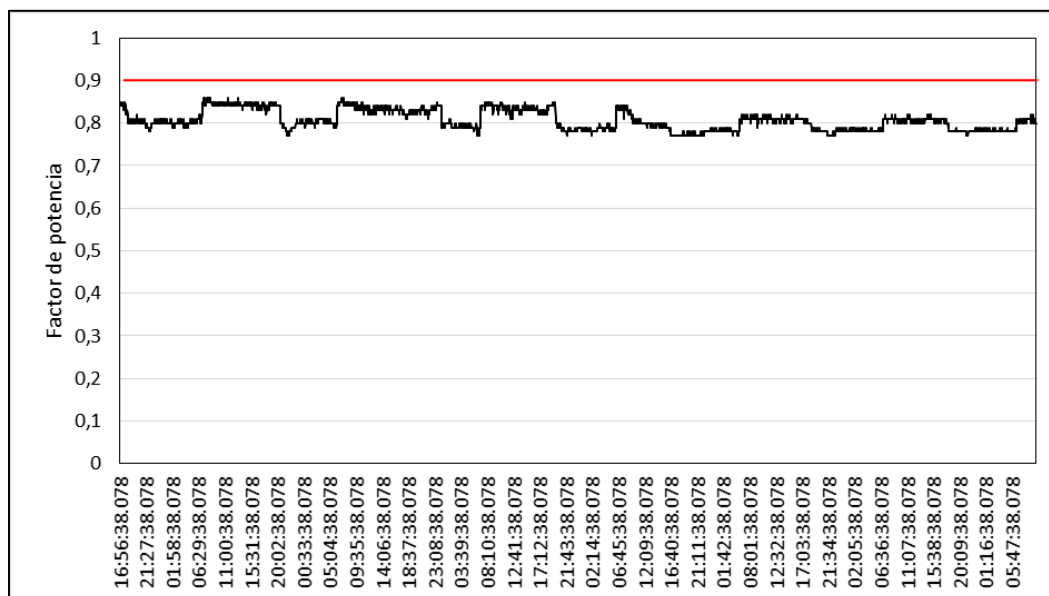


Figura 50. Registro del factor de potencia.

### Comportamiento de la potencia de entrada en el tiempo:

*El comportamiento de la potencia de entrada es prácticamente constante. Esto permite concluir que el variador de frecuencia no está realizando ninguna función, sin embargo, está generando altos niveles de armónicos, lo que afecta el funcionamiento del motor, reduce su eficiencia y por lo tanto, aumenta el consumo innecesario de energía.*

En la figura 51 se observa el comportamiento de la carga en el tiempo En la tabla 21 se muestran las principales variables estadísticas de las mediciones.

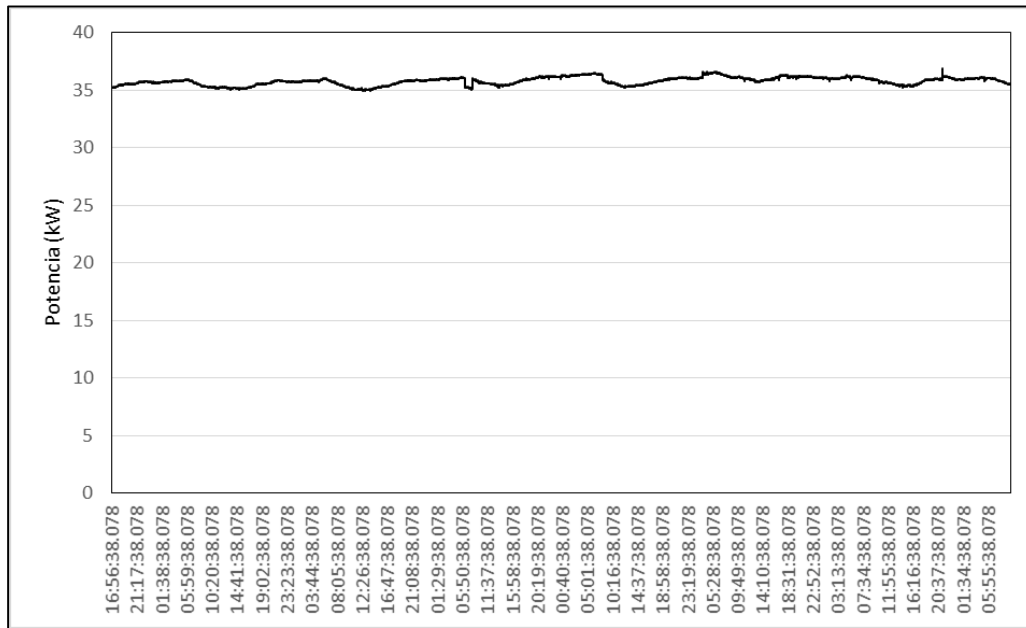


Figura 51. Comportamiento de la potencia de entrada.

Tabla 21. Variables estadísticas del comportamiento de la potencia.

Potencia Máxima (kW)	Potencia Mínima (kW)	Potencia Promedio (kW)	Desviación Estándar (kW)
36,90	34,96	35,78	0,34

### Factor de carga del motor (FC).

*El motor se encuentra trabajando en condiciones de operación favorables pues su factor de carga está alrededor del 73 %.*

En la figura 52 se observa el factor de carga del motor.

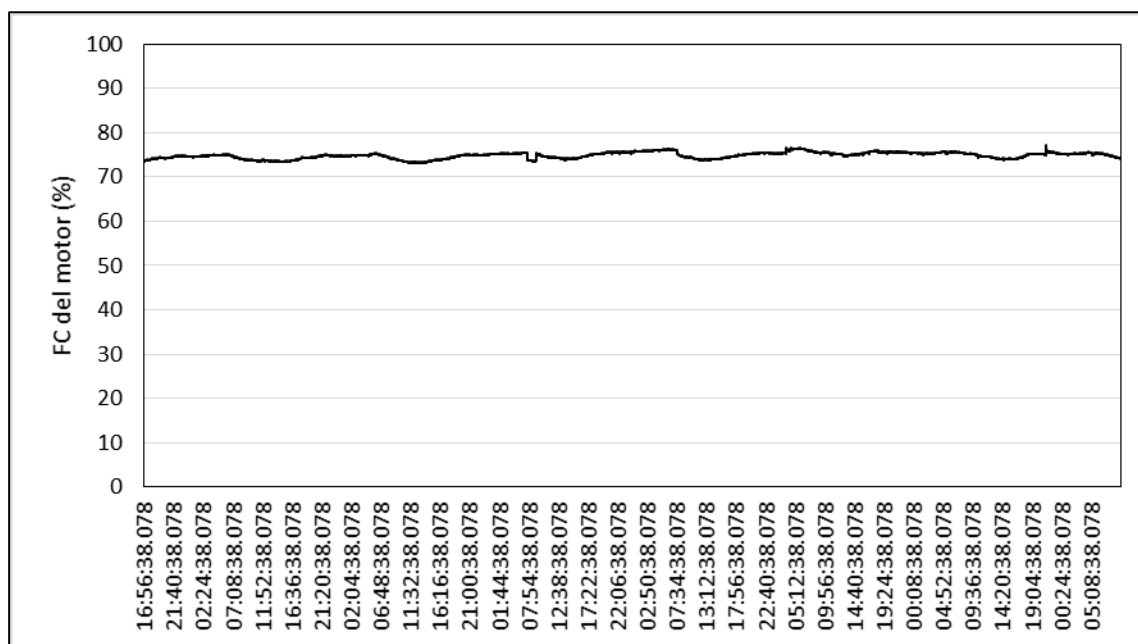


Figura 52. Factor de carga del motor.

### **Evaluación del impacto del uso innecesario del variador de frecuencia**

A continuación se realiza una estimación de las pérdidas en el sistema variador-motor por el uso innecesario del variador de frecuencia. En el análisis se consideran las pérdidas propias del variador de frecuencia y el incremento en las pérdidas del motor como resultado de los armónicos generados por el variador. En la próxima etapa del proyecto se realizarán mediciones que permitirán precisar mejor los resultados.

#### **Datos:**

Eficiencia del motor:  $\eta_{\text{motor}} = 93,6 \%$ . Datos de placa del motor.

Eficiencia del variador:  $\eta_{\text{variador}} = 97 \%$ . Datos de fabricante del variador.

Pérdidas por armónicos:  $P_a = 5\%$ . Esto es según la norma ANSI/NEMA MG1-2011 para THD=6%.

Potencia de salida del motor estimada:  $P_{\text{sal}} = 33,49 \text{ kW}$

Horas de trabajo por día:  $h_d = 24 \text{ h}$ .

Días al año:  $d = 320$ .

#### **Estimación de $P_{\text{sal}}$ .**

La potencia de salida del motor se estimó aplicando el método de la placa de la forma siguiente:

$$P_{\text{sal}} = P_{\text{ent}} \cdot \eta_{\text{motor}} \quad (6)$$

donde:  $P_{\text{ent}}$  es la potencia promedio consumida por el motor presentada en la tabla 16.

sustituyendo en (6)

$$P_{\text{sal}} = 35,78 \cdot 0,936 = 33,49 \text{ kW}.$$

Las pérdidas en el conjunto variador-motor considerando los armónicos ( $Perd_{(v-m-a)}$ ), se calculan como:

$$Perd_{(v-m-a)} = P_{sal} \cdot (1 - (\eta_{motor} \cdot \eta_{variador} \cdot k_a)) \quad (7)$$

donde  $k_a$  es el factor que considera las pérdidas por armónicos,

$$k_a = 1 - P_a = 1 - 0,05 = 0,95$$

Sustituyendo los datos en (7).

$$Perd_{(v-m-a)} = 33,49kW \cdot (1 - (0,936 \cdot 0,97 \cdot 0,95))$$

$$Perd_{(v-m-a)} = 4,6 \text{ kW}$$

Considerando 24 horas de trabajo en 320 días al año, las pérdidas de energía ( $E_{pérdidas}$ ) por el mal uso del variador de frecuencia es de:

$$E_{pérdidas} = Perd_{(v-m-a)} \cdot h_d \cdot d \quad (8)$$

sustituyendo los datos:

$$E_{pérdidas} = 4,6 \text{ kW} \cdot 24h \cdot 320$$

$$E_{pérdidas} = 35328 \text{ kWh/año}$$

Considerando el precio del kWh a 140 COP, estas pérdidas de energía representan unas pérdidas económicas de \$4 945 920 COP al año. Estas pérdidas pueden evitarse conectando el motor sin el uso del variador de frecuencia, pues este no está realizando ninguna función.

#### Recomendaciones.

1. Analizar el efecto del bajo factor de potencia en el circuito de la empresa.
2. Conectar el motor sin el empleo del variador de frecuencia.

#### *4.4.7. CIRCUITO 7.*

Pizarra de distribución: 230 V, 3Φ.

Equipo de medición: Analizador de redes Fluke, clase A.

Circuito que alimenta: Motor de colector de polvo 2.

Tiempo de medición: (24 de septiembre-1 de octubre).

Tabla 22. Datos nominales del motor del colector de polvo 2.

Marca	NIDEC
Función	Colector de polvo
Potencia	40 HP; 29,84 kW
Tensión	230 V
Corriente	90 A
Velocidad	1780 rpm
Factor de potencia	0,88
Eficiencia	94,1



El motor se alimenta a través de un variador de frecuencia.

## Resultados.

### Desequilibrio de tensión (DT).

*Durante las mediciones realizadas se observó que las tensiones del circuito están equilibradas, pues los valores de DT estuvieron por debajo del 2%, valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

*Se observa además una variación cíclica de la tensión debido a la variación de la carga en la empresa.*

La figura 53 muestra los registros de las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ . La figura 54 muestra los registros de DT.

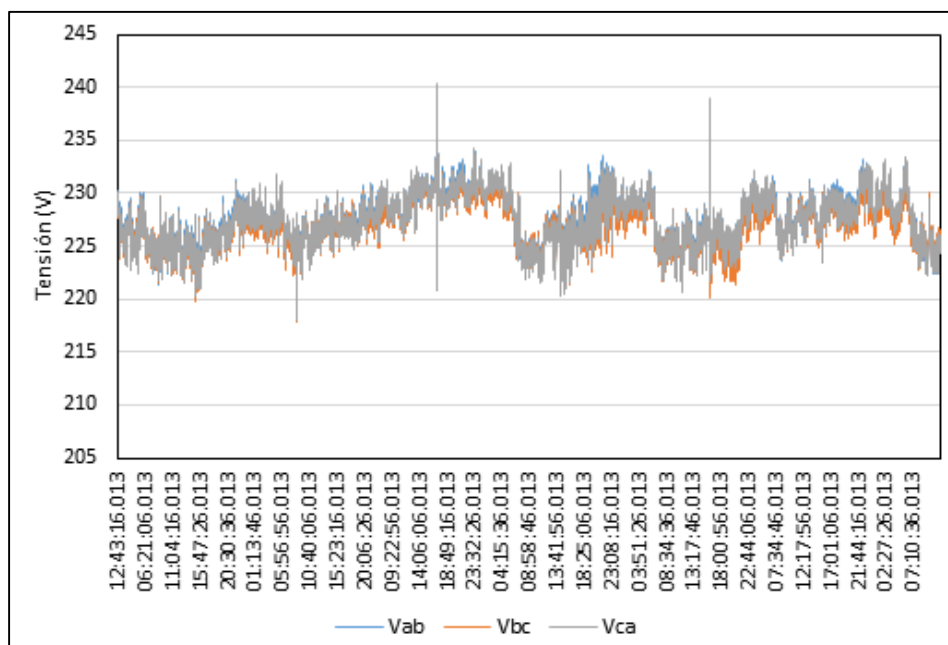


Figura 53. Registro de las tensiones de línea.

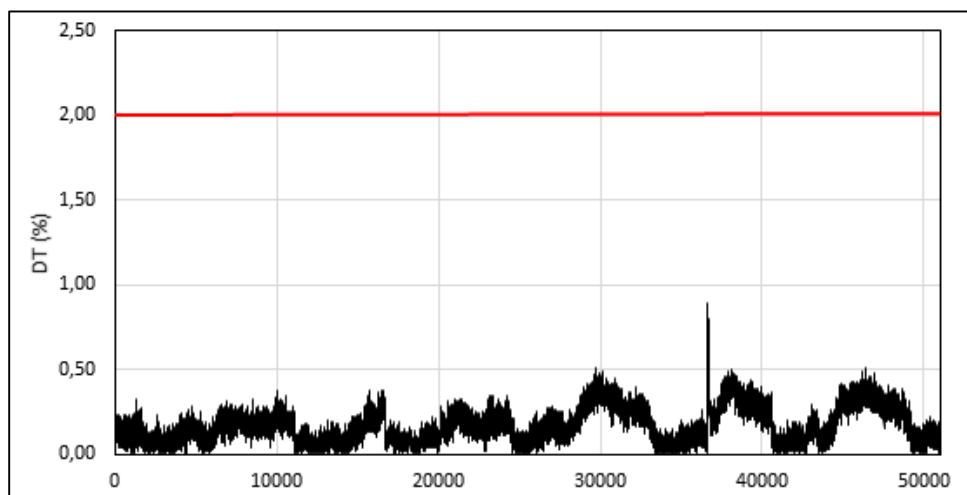


Figura 54. Registro del desequilibrio de tensión.

### Variación de tensión (VT).

*Las mediciones muestran que la tensión de operación del circuito es adecuado, pues los valores de VT estuvieron dentro de los límites establecidos por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 1159-1995.*

En la figura 55 se muestra el comportamiento de la variación de tensión.

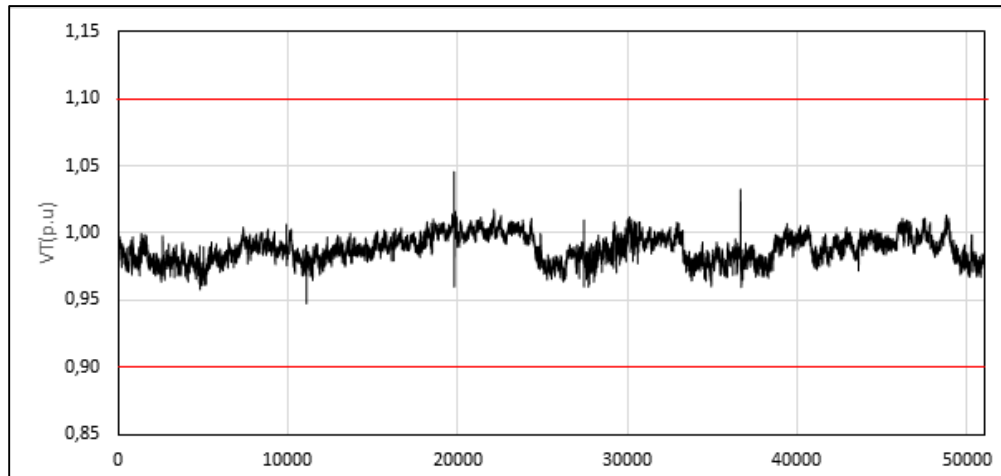


Figura 55. Registro de la variación de tensión.

### Distorsión armónica total (THD).

*Las mediciones mostraron que no existen problemas de contaminación de armónicos, pues aunque los valores de THD son considerables debido al variador de frecuencia, no superan el 5%, que es valor límite establecido por la regulación CREG-070-1998 y la norma IEEE 519-1995. Estos altos niveles de armónicos son generador por el variador de frecuencia.*

En la figura 56 se observa el comportamiento de THD en los registros realizados.

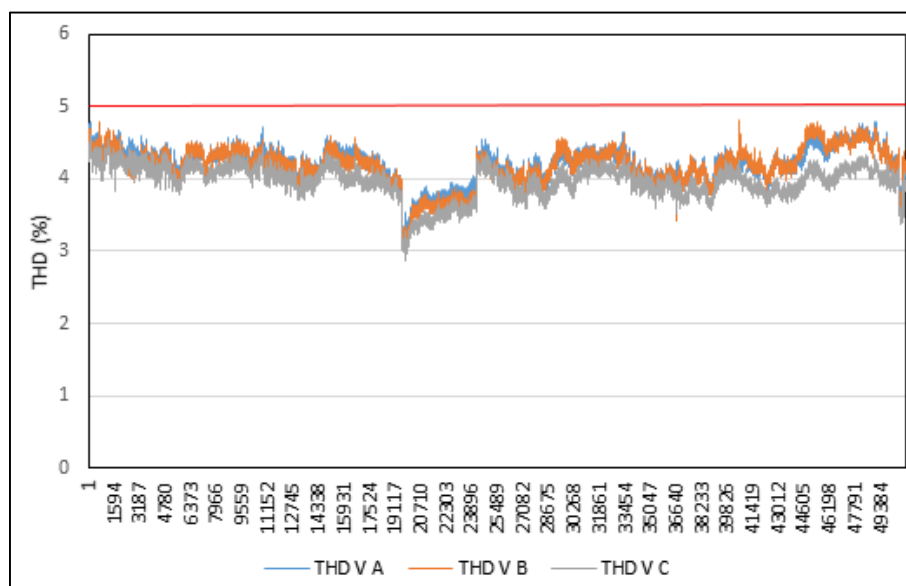


Figura 56. Registro de la distorsión armónica total de tensión.

### **Factor de potencia.**

*En las mediciones realizadas se observa que el factor de potencia es bajo, con valores inferiores a 0,9, límite establecido por la regulación CREG-047-2004.*

En la figura 57 se muestra el comportamiento del factor de potencia.

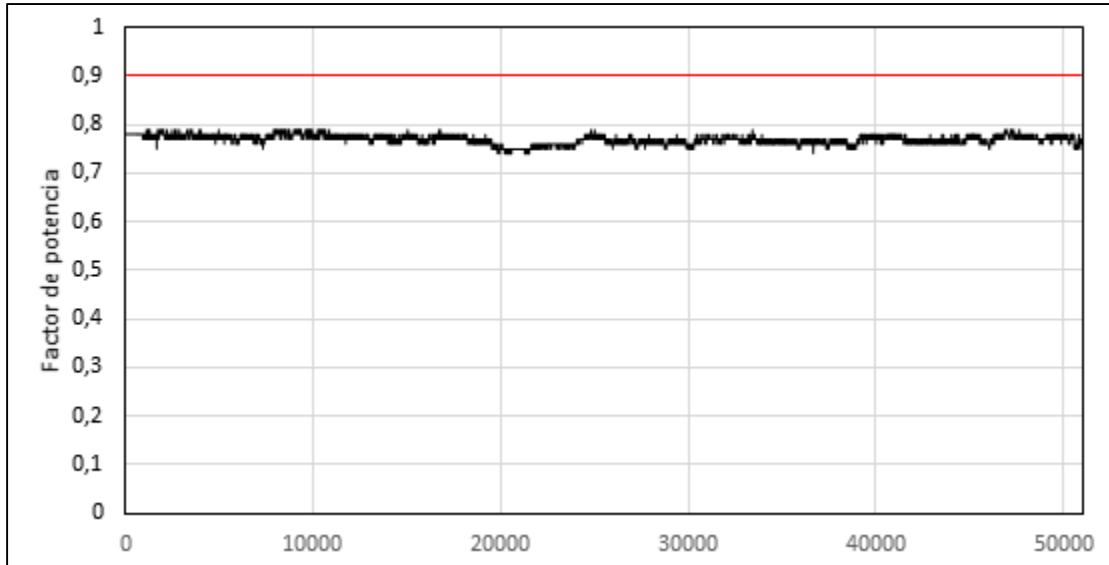


Figura 57. Registro del factor de potencia.

### **Comportamiento de la potencia de entrada en el tiempo:**

*El comportamiento de la potencia de entrada, aunque varía un poco, no se corresponde con la variación esperada por el uso del variador de frecuencia. Esto permite concluir que el variador no está realizando ninguna función, sin embargo, está generando altos niveles de armónicos, lo que afecta el funcionamiento del motor, reduce su eficiencia y por lo tanto, aumenta el consumo innecesario de energía.*

En la figura 58 se observa el comportamiento de la potencia de entrada en el tiempo. En la tabla 23 se muestran las principales variables estadísticas de las mediciones, aquí no se consideran los valores picos debido a fenómenos transitorios producidos por arranques y paradas.

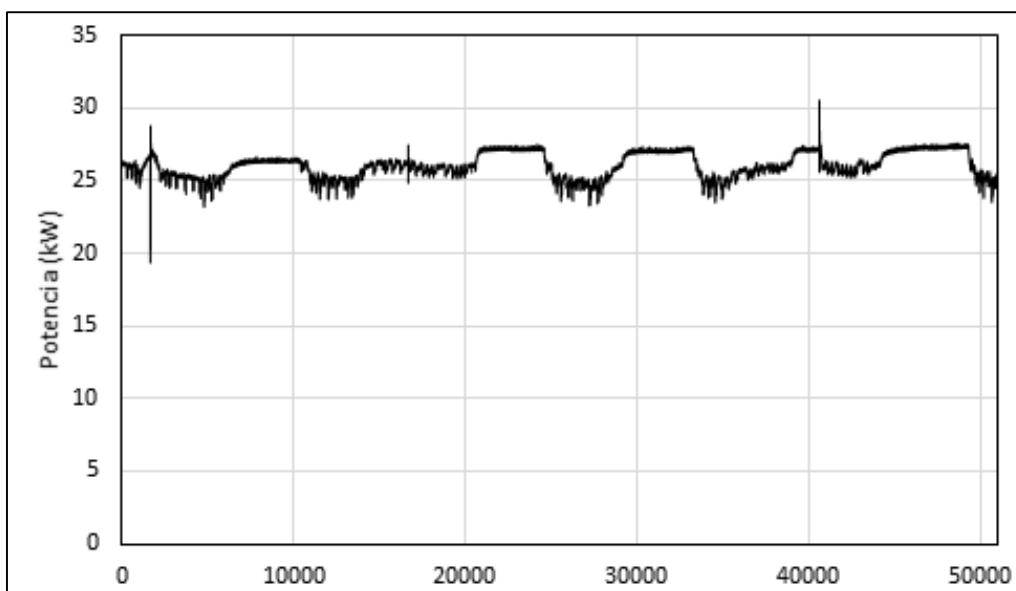


Figura 58. Comportamiento de la potencia de entrada.

Tabla 23. Variables estadísticas del comportamiento de la potencia.

Potencia Máxima (kW)	Potencia Mínima (kW)	Potencia Promedio (kW)	Desviación Estándar (kW)
27,95	23,19	26,01	0,89

### **Factor de carga del motor (FC).**

*El motor se encuentra trabajando en condiciones de operación favorables pues su factor de carga está alrededor del 82 %.*

En la figura 59 se observa el factor de carga del motor.

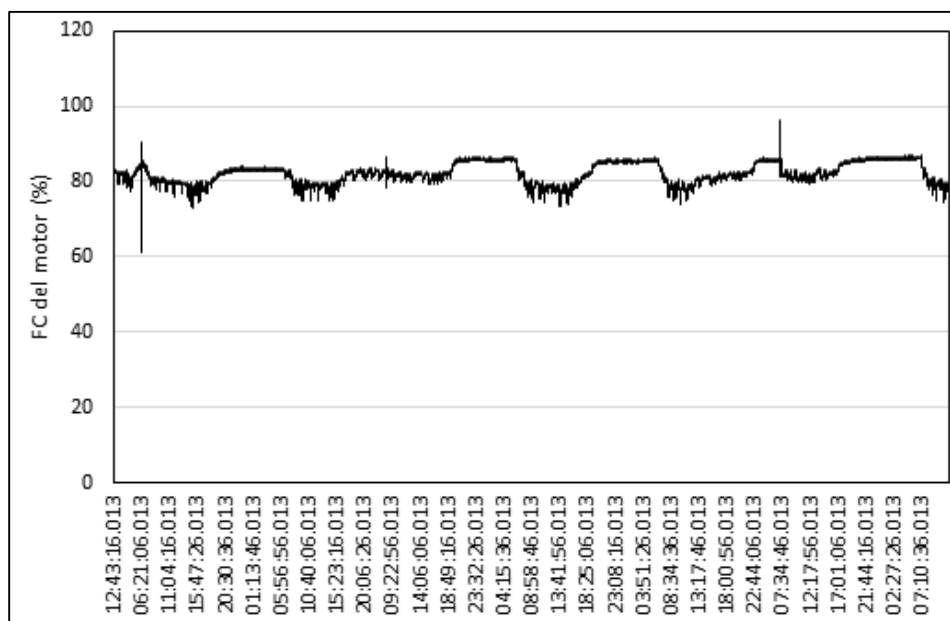


Figura 59. Factor de carga del motor.

#### 4.4.8. MOTORES DE MAYOR CONSUMO EN LA EMPRESA.

Se realizaron mediciones instantáneas a los motores siguientes:

- Motor del equipo de óxido 2.
- Motor del equipo metalurgia.
- Motor del colector de polvo 2.
- Motor de la lavadora de baterías.
- Motor de la bomba de la mesa de carga.
- Motor del ventilador torre de enfriamiento de la torre 1.
- Motor del ventilador de torre de enfriamiento de la torre 2.
- Motor del ventilador de torre de enfriamiento de la torre 3.
- Motores de la bomba de las torre 1.
- Motores de la bomba de las torre 2.
- Motores 1 y 2 de las bombas de las torre 3.

#### **Datos de los motores y resultados de las mediciones instantáneas.**

##### Motor del equipo de óxido 2.

Tabla 24. Datos nominales del motor del equipo de óxido 2.

Marca	WEG
Función	Equipo de óxido 2
Potencia	75 HP; 55,95 kW
Tensión	230 V
Corriente	273,6 A
Velocidad	1180 rpm
Factor de potencia	0,85
Eficiencia	92,4 %



Figura 60. Motor del equipo de óxido 2.

Tabla 25 .Mediciones del motor del equipo de óxido 2.

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
101	220,2	0,85	32,7	54

El factor de carga obtenido de alrededor del 50% es considerado bajo. Esto provoca que la eficiencia del motor se reduzca y por lo tanto aumenta el consumo de energía. A continuación se realiza una estimación de las pérdidas energéticas y económicas que esto produce.

Datos:

$P_{sal} = 30,21$  kW. Potencia de salida estimada aplicando el método de placa.

$\eta_{motor1} = 92,4$  %. Datos de placa del motor.

$\eta_{motor1} = 90$  %. Eficiencia aproximada para el factor de carga del 54% según el catálogo de fabricante.

Las pérdidas estimadas por bajo factor de carga se estiman como:

$$Perd = P_{sal} \cdot \left( \frac{1}{\eta_{motor2}} - \frac{1}{\eta_{motor1}} \right) \quad (9)$$

sustituyendo:

$$Perd = 30,21 \text{ kW} \cdot \left( \frac{1}{0,90} - \frac{1}{0,924} \right)$$

$$Perd = 0,87 \text{ kW}$$

Considerando 24 horas de trabajo en 320 días al año, las pérdidas de energía ( $E_{pérdidas}$ ) por bajo factor de carga es de:

$$E_{pérdidas} = Perd \cdot h_d \cdot d \quad (10)$$

sustituyendo los datos:

$$E_{pérdidas} = 0,87 \text{ kW} \cdot 24\text{h} \cdot 320$$

$$E_{pérdidas} = 6681,6 \text{ kWh/año}$$

Considerando el precio del kWh a 140 COP, estas pérdidas de energía representan unas pérdidas económicas de \$ 935 424 COP al año. Estas pérdidas pueden evitarse sustituyendo el motor actual por un motor de 37 kW (50HP) en caso de avería del actual.

### Motor del equipo metalurgia.

Tabla 26. Datos nominales del motor del equipo metalurgia.

Marca	WEG
Función	Metalurgia
Potencia	40 HP; 29,84 kW
Tensión	230 V
Corriente	96,4 A
Velocidad	1775 rpm
Factor de potencia	0,83
Eficiencia	94,1 %



Figura 61. Motor del equipo de metalurgia

Tabla 27 .Mediciones motor del equipo de metalurgia.

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
82	220	0,83	25,9	81,6

### Motor del colector de polvo 2.

Tabla 28. Datos nominales del motor del colector de polvo 3.

Marca	WEG
Función	Colector de polvo 2
Potencia	25 HP; 18,65 kW
Tensión	230 V
Corriente	59,2 A
Velocidad	1740 rpm
Factor de potencia	0,85
Eficiencia	92,4 %



Figura 62. Motor del equipo del colector de polvo 3.

Tabla 29. Mediciones del colector de polvo 3.

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
43,3	228,1	0,85	14,5	71.8

#### Motor de la lavadora de baterías.

Tabla 30. Datos nominales del motor de la lavadora de baterías.

Función	Lavadora de baterías.
Potencia	15 HP; 11,19 kW
Eficiencia	92,4 %



Figura 63. Ubicación del motor de lavadora de baterías.

Tabla 31 .Mediciones del motor de la lavadora de baterías.

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
14,1	217,7	0,86	4,6	38



El factor de carga del 38% es considerado bajo. Esto produce la reducción de la eficiencia del motor y el aumento del consumo de energía. Las pérdidas energéticas y económicas se estiman a continuación:

Datos:

$P_{sal} = 4,25 \text{ kW}$ . Potencia de salida estimada aplicando el método de placa.

$\eta_{motor1} = 92,4 \%$ . Datos de placa del motor.

$\eta_{motor1} = 89 \%$ . Eficiencia aproximada para el factor de carga del 38% según el catálogo de fabricante.

Las pérdidas estimadas por bajo factor de carga se estiman aplicando la ecuación (9):

$$Perd = 4,25 \text{ kW} \cdot \left( \frac{1}{0,89} - \frac{1}{0,924} \right)$$

$$Perd = 0,18 \text{ kW}$$

Considerando 24 horas de trabajo en 320 días al año, las pérdidas de energía ( $E_{pérdidas}$ ) por bajo factor de carga es de:

$$E_{pérdidas} = 0,18 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 320$$

$$E_{pérdidas} = 1328,4 \text{ kWh/año}$$

Considerando el precio del kWh a 140 COP, estas pérdidas de energía representan unas pérdidas económicas de \$ 193 536 COP al año. Estas pérdidas pueden evitarse sustituyendo el motor actual por un motor de 5,5 kW (7,5HP) en caso de avería del actual.

Bomba de la mesa de carga.

Tabla 32. Datos nominales del motor de la bomba de la mesa de carga.

Marca	WEG
Función	Bomba de la mesa de carga.
Potencia	5 HP; 3,73 kW
Tensión	220 V
Corriente	14,6 A
Velocidad	3460 rpm
Factor de potencia	0,80
Eficiencia	80,5 %



Figura 64. Bomba de la mesa de carga.

Tabla 33 .Mediciones del motor de la bomba de la mesa de carga.

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
12,3	225,4	0,8	3,8	82

Motor del ventilador de torre de enfriamiento de la torre 3.

Tabla 34. Datos nominales del motor del ventilador de torre de enfriamiento de la torre 3.

Función	Ventilador de torre de enfriamiento.
Potencia	10 HP; 7,46kW
Eficiencia	92 %



Figura 65. Caja de conexiones del motor del ventilador de torre de enfriamiento de la torre 3.

Tabla 35 .Mediciones del motor del ventilador de torre de enfriamiento de la torre 3.

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
21,7	218,22	0,86	7,1	87,5

Motores de las bombas de las torres de enfriamiento 1, 2 y 3 y de los ventiladores de las torres de enfriamiento 1 y 2.

Tabla 36. Datos nominales de los motores de las bombas de las torres de enfriamiento 1, 2 y 3.  
Ventiladores de las torres de enfriamiento 1 y 2.

Marca	WEG
Potencia	5 HP; 3,73 kW
Tensión	220 V
Corriente	14,6 A
Velocidad	3460 rpm
Factor de potencia	0,80
Eficiencia	80,5



Figura 66. Bombas 1 y 2 de la torre 3.

Tabla 37 .Mediciones motor de la bomba (Torre 1).

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
12,5	216,9	0,8	3,8	82

Tabla 38 .Mediciones motor de la bomba (Torre 2).

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
13,9	217,9	0,8	4,2	90,7

Tabla 39 .Mediciones motor de la bomba 1 (Torre 3).

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
11,4	225	0,8	3,6	77.8

Tabla 40 .Mediciones motor de la bomba 2 (Torre 3).

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
14	226	0,8	4,4	95

Tabla 41 .Mediciones motor del ventilador torre de enfriamiento (Torre 1).

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
9,9	226	0,8	3,1	67

Tabla 42 .Mediciones del motor del ventilador de torre de enfriamiento (Torre 2).

Corriente (A)	Tensión (V)	Factor de potencia (p.u)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de carga (%)
12	226	0,8	3,8	82

#### 4.5. Perfil de consumo horario de la empresa.

A partir de las mediciones realizadas y con los datos de la demanda total de la fábrica obtenidos del reporte de la empresa suministradora de energía, se obtuvo el perfil de consumo horario de la empresa. En la figura 67 se presenta el perfil con los principales consumidores de energía.

Como se puede observar, el perfil de consumo horario de la empresa es variable, presentándose la mayor demanda durante el día. Se observa además, que su comportamiento está marcado fundamentalmente por el perfil de demanda del área de las mesas de cargas de baterías, la cual presenta su mayor demanda en el horario de las 12 a las 19 horas. Esta área constituye, con una marcada diferencia, la principal carga de la empresa. La segunda carga más importante es el área de los compresores.

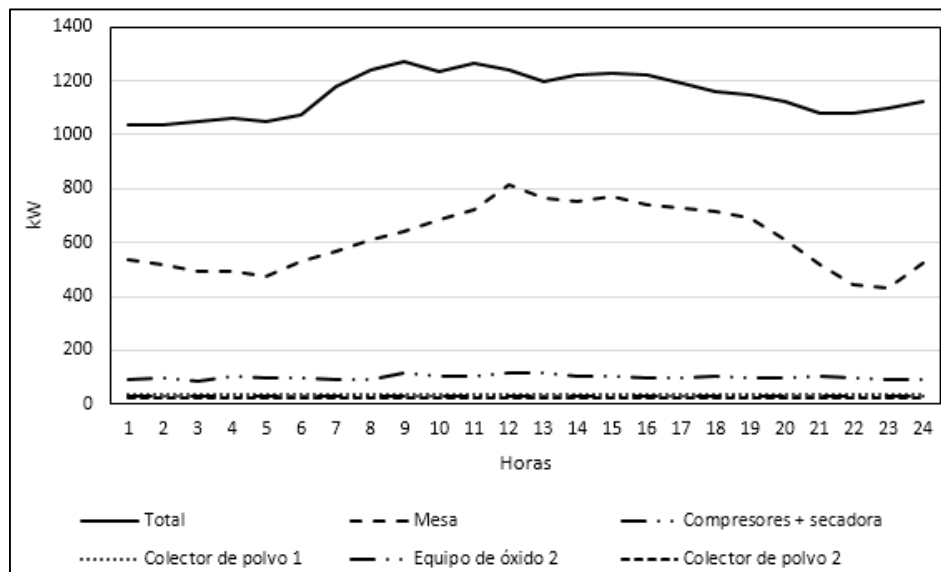


Figura 67. Perfil de consumo horario de la empresa.

#### 4.6. Diagrama de Pareto.

Con el perfil de demanda se obtuvo el consumo de energía de las áreas y cargas analizadas para un día típico. Esto permitió obtener el diagrama de Pareto e identificar los principales consumidores de energía de la empresa, sobre los cuales se deberán de realizar acciones de búsqueda de oportunidades de ahorro. En la

figura 68 se muestra el diagrama de Pareto con las cargas que representan el 70% del consumo total y en la tabla 43 se presentan los datos correspondientes al diagrama.

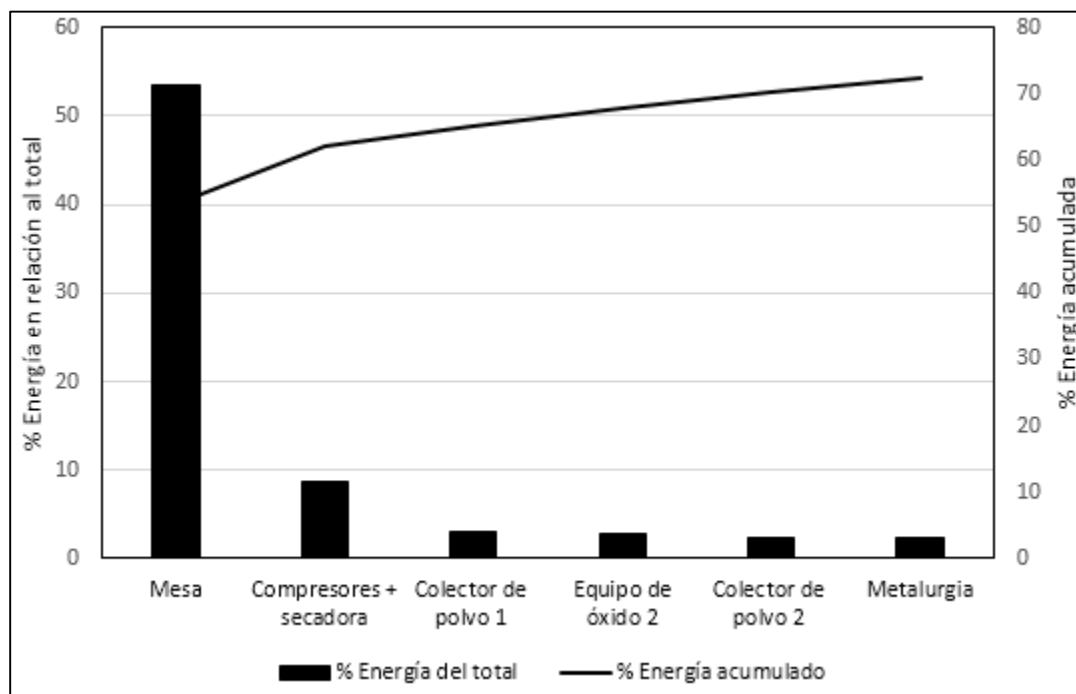


Figura 68. Diagrama de Pareto.

Tabla 43. Principales cargas consumidoras de la empresa.

Áreas y equipos	Energía del total (%)	Energía acumulada (%)
Mesas de carga	53,37	53,37
Compresores y secadora	8,70	62,07
Motor del colector de polvo 1	3,04	65,11
Motor del equipo de óxido 2	2,84	67,95
Motor del colector de polvo 2	2,26	70,21
Motor de metalurgia	2,26	72,47
Área administrativa	1,56	74,03
Motor del colector de polvo 3	1,26	75,29
Motor del ventilador de la torre enfriamiento 3	0,61	75,90
Motor de la lavadora de baterías	0,37	76,27
Motor del ventilador de la torre enfriamiento 2	0,36	76,63
Bomba de la torre enfriamiento 3	0,34	76,97
Bomba de la mesa de carga	0,31	77,28
Bomba de la torre de enfriamiento 3	0,31	77,58
Bomba de la torre de enfriamiento 2	0,31	77,89
Bomba de la torre de enfriamiento 1	0,29	78,18
Motor del ventilador de la torre enfriamiento 1	0,25	78,44

Como se observa el principal consumidor de energía lo constituye las mesas de carga de baterías representando el 53,37% del total, los compresores representan el 8,7% y el resto de las cargas analizadas representan menos del 5% cada una. Sobre los principales consumidores debe de enfocarse las acciones de ahorro de energía.

## **Bibliografía**

- Alabbasi, A., Rezki, Z., Shihada, B., (2014). Energy efficient scheme for cognitive radios utilizing soft sensing. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 701-706.
- Backlund, S., Thollander, P., Palm, J., Ottosson, M. (2012). Extending the energy efficiency gap. *Energy Policy*, 51, 392–396.
- Block, L., Larsen, A., Togeby, M. (2006). Empirical analysis of energy management in Danish Industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 516–526.
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, F. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*. 19 (6), 667-679.
- Cabello, J., Santos, V., Gutiérrez, A., Álvarez Guerra, M., Haeseldonckx, D., Vandecasteele, C. (2016). Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels. *Journal of Cleaner Production*. 137(20), 803-812.
- Chen, H., Wei, Y., Luo, Y., Duan, S. (1996). Study and application of several-step tank formation of lead/acid battery plates. *Journal of power sources*. 59(1), 59-62.
- Chowdhury, A. (2015). How Soft Sensing Using Simulation Enhances Plant Process Management. Resource document. Cognizant 20-20 Insights. <https://www.cognizant.com/whitepapers/how-soft-sensing-using-simulation-enhances-plant-process-management-codex1186.pdf> . August 2016.
- Cope, R. C., Podrazhansky, Y. (1999). The art of battery charging. *Battery Conference on Applications and Advances*, The Fourteenth Annual. Long Beach, CA, USA, 233-235.
- Dahodwalla, H., Herat, S. (2000). Cleaner production options for lead-acid battery manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*. 8(2), 133-142.
- Fawkes, S., Oung, K., Thorpe, D. (2016). Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement. An Introduction for Policy Makers. Source of document. Copenhagen Centre on Energy Efficiency and United Nations Environment Programme (UNEP). Copenhagen. [http://www.unepdtu.org/media/Sites/energyefficiencycentre/Publications/C2E2%20Publications/Best-Practises-for-industrialal-EE\\_web.ashx?la=da](http://www.unepdtu.org/media/Sites/energyefficiencycentre/Publications/C2E2%20Publications/Best-Practises-for-industrialal-EE_web.ashx?la=da). August 2016 .
- Fortuna, L., Graziani, S., Xibilia, M.G. (2005). Soft sensors for product quality monitoring in debutanizer distillation columns. *Control Engineering Practice*. 13(4), 499-508.
- Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R. (2001). *The elements of statistical learning* (Vol. 1). Springer, Berlin: Springer series in statistics.
- Giacone, E., Mancò, S. (2012). Energy efficiency measurement in industrial processes. *Energy* 38(1), 331-345
- Gielen, D., Taylor P. (2009). Indicators for industrial energy efficiency in India. *Energy*. 34(8), 962-969.

- Goldberg, A., Reinaud, J., Taylor, R. (2011). Promotion Systems and Incentives for Adoption of Energy Management Systems in Industry. Source of document. Institute for Industrial Productivity, Washington, DC, United States. <http://www.iipnetwork.org/IIP-6.%20PromotionSystemsEnMSChina1.pdf>. September 2016.
- Gomnam, E., Jazayeri-rad, H. (2013). Development of an adaptive soft sensor based on FCMILSSVR. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2(2), 199-203.
- Schluchter, M.D. (2014). Mean Square Error. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. DOI: 10.1002/9781118445112.stat05906.
- Di Mauro, G. F., Ferreyra, R., Suárez, J. A., & Jurado, A. D. (2015). Overvoltage by Ferroresonance on a Rural Distribution Feeder&58; Case Report and Simulation. *Inge-Cuc*, 11(1), 34-47.
- Dodge, Y. (2008). *The concise encyclopedia of statistics*. Springer-Verlag. New York. United States.
- Goytisol Espinosa, R. A., Noa Águila, J. G., Arzola de la Peña, N., Castellanos González, L., Hernández Herrera, H., López Torres, L., & Fernández Cañizares, A. (2005). Evaluación de la fractura por fatiga del cigüeñal de un motor Diesel. *Ingeniería Mecánica*, 8(2),
- Hadid, B., Ouvrad, R., Le Brusquet, L., Poinot, T., Etien, E., Sicard, F., Grau, A. (2014). Design low cost sensors for industrial process energy consumption measurement. Application to the gas flow consumed by a boiler. In B Hadid (Ed). *Sensing Technology: Current Status and Future Trends IV.* (pp 24-46). Springer-Verlag. New York. United States.
- Hernández Herrera, H., Cabello Eras, J. J., Goytisol Espinosa, R., y Balbis Morejón, M. (2015). Tensiones en uniones soldadas a tope con perfiles abiertos bajo torsión. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23(4), 638-646.
- Hong, S.J., Jung, J.H., Han, C. (1999). A design methodology of a soft sensor based on local models. *Computers & Chemical Engineering*. 23(1), S351-S354.
- ISO. 2011. 50001. (2011). *Energy management systems--Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.
- ISO. 2012. 50004. (2012). *Energy management systems — Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system*. International Organization for Standardization.
- ISO. 2014. 50006. (2014). *Energy management systems. Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI). General principles and guidance*. International Organization for Standardization.
- IEC 60095-1. (2000). *Lead-acid starter batteries—part 1: General requirements and methods of test*.
- Järvisalo, M., Ahonen, T., Ahola, J., Kosonen, A., Niemelä, M. (2016). Soft-sensor-based flow rate and specific energy estimation of industrial variable-speed-driven twin rotary screw compressor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 63(5), 3282-3289.
- Jung, J., Zhang, L., Zhang, J. (2016). *Lead-acid Battery technologies. Fundamentals, materials, and applications*. CRC Press. Taylor & Francis Group. New York.
- Kadlec, P., Gabrys, B., Strandt, S. (2009). Data-driven soft sensors in the process industry. *Computers & Chemical Engineering*. 33(4), 795-814.
- Kalos, A., Kordon, A., Smits, G., Werkmeister, S. (2003). Hybrid model development methodology for industrial soft sensors. In *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003* (Vol. 6, pp. 5417-5422). IEEE. Denver, United States.

- Kaneko, H., Funatsu, K. (2016). Preparation of comprehensive data from huge data sets for predictive soft sensors. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 153, 75-81.
- Kiessling, R. (1992) . Lead acid battery formation techniques. Source of document. Digatron Firing Circuits. [http://www.digatron.com/fileadmin/pdf/lead\\_acid.pdf](http://www.digatron.com/fileadmin/pdf/lead_acid.pdf) . August 2011.
- Kortela, J., Jämsä-Jounela, S. L. (2012). Fuel-quality soft sensor using the dynamic superheater model for control strategy improvement of the BioPower 5 CHP plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 42(1), 38-48.
- Leonow, S., Mönnigmann, M. (2014). Automatic controller tuning for soft sensor based flow rate control. *The International Federation of Automatic Control Proceedings Volumes*. 47, 5229-5234.
- Li, Z., Luan, X., Liu, T., Jin, B., Zhang, Y. (2014). Room Cooling Load Calculation Based on Soft Sensing. In *International Conference on Life System Modeling and Simulation and International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment*. (331-341). Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Germany.
- Lin, B., Recke, B., Knudsen, J.K., Jørgensen, S.B. (2007). A systematic approach for soft sensor development. *Computers & chemical engineering*. 31(5), 419-425.
- Liu, J. (2016). Developing a soft sensor with online variable reselection for unobserved multi-mode operations. *Journal of Process Control*. 42, 90-103.
- Lu, B., Durocher, D., Stemper, D. (2008). Online and nonintrusive continuous motor energy and condition monitoring in process industries. *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2008. PPIC 2008*. Source of document. *Conference Record of 2008 54th Annual*. . [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4585821](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4585821). August 2016.
- Mansano, R., Rodrigues, E., Oliveira, T., Godoy, E.P. (2014). A soft sensor for energy efficient application of wireless networked control systems. *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 4738-4744.
- Maury, Z. D. L. C. S., & Vilas, A. F. (2015). Análisis Urbano y Comunidades Inteligentes: Una Aproximación al Empleo de la Tecnología en la Movilidad Cotidiana. *INGE CUC*, 11(1), 9-24.
- Marwell, E., Finger, E., Sands, E. (1981) . *Curtis Battery Book 1*. Souce of document. Curtis Instruments SA. [http://evbatterymonitoring.com/WebHelp/Battery\\_Book.htm#Section\\_3.htm](http://evbatterymonitoring.com/WebHelp/Battery_Book.htm#Section_3.htm) . September 2016.
- McAvoy, T., 1992. Contemplative stance for chemical process control. *Automatic*. 28(2), 441-442.
- McElroy, L., Bao, J., Yang, R.Y., Yu, A.B. (2009). Soft-sensors for prediction of impact energy in horizontal rotating drums. *Powder Technology*. 195(3), 177-183.
- McKane, A., Scheihing, P., Williams, R. (2008). Certifying industrial energy efficiency performance: aligning management, measurement, and practice to create market value. Source of document. Lawrence Berkeley National Laboratory. [http://aceee.org/files/proceedings/2007/data/papers/56\\_5\\_049.pdf](http://aceee.org/files/proceedings/2007/data/papers/56_5_049.pdf). September 2016.
- Miloloža, I. (2013). Tendencies of development of global battery market with emphasis on republic of Croatia. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*. 11(3), 318-333.
- Najar, S., Tissier, J., Etien, E., Cauet, E. (2015) . Soft sensor for distribution transformers: thermal and electrical models. Sorce of document. 23rd International Conference on Electricity Distribution. CIRED 2015. Lyon, France. [http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015\\_0419\\_final.pdf](http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015_0419_final.pdf) . October 2016.



- Palamutcu, S. (2010). Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. *Energy*. 35(7), 2945-2952.
- Pavlov, D. (2011). *Lead-acid batteries: Science and technology. A handbook of lead-acid battery technology and its Influence on the product* (1st Ed). Amsterdam. Elsevier.
- Pavlov, D., Petkova, G., Dimitrov, M., Shiomi, M., Tsubota, M. (2000) . Influence of fast charge on the life cycle of positive lead–acid battery plates. *Journal of power sources*. 87(1), 39-56.
- Petkova, G., Pavlov, D. (2003). Influence of charge mode on the capacity and cycle life of lead–acid battery negative plates. *Journal of power sources*. 113(2), 355-362.
- Ploennigs, J., Ahmed, A., Hensel, B., Stack, P., Menzel, K. (2011). Virtual sensors for estimation of energy consumption and thermal comfort in buildings with underfloor heating. *Advanced Engineering Informatics*. 25(4), 688-698.
- Ponce, M., Moreno, E. (2015). Alternative definitions of energy for power meters in non-sinusoidal systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 64, 1206-1213.
- Poscha, A., Brudermann, T., Braschela, N., Gabriel, M. (2015). Strategic energy management in energy-intensive enterprises: a quantitative analysis of relevant factors in the Austrian paper and pulp industry. *Journal of Cleaner Production*. 90, 291–299.
- Prout, L. (1993). Aspects of lead/acid battery technology 4. Plate formation. *Journal of power sources*. 41(1), 195-219.
- Qi, F., Shukeir, E., Kadali, R., 2015. Model Predictive Control of Once Through Steam Generator Steam Quality. *IFAC-Papers on Line*. 48, 716-721.
- Rantik, M. (1999). Life cycle assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes. KFB – Kommunikations forsknings-beredningen. Stockholm.
- Report Buyer Ltd., (2015). Global and China Lead-acid Battery Industry Report, 2015-2018. Source of document. Battery Industry Report. <https://www.reportbuyer.com/product/3548160/global-and-china-lead-acid-battery-industry-report-2015-2018.html>. July 2016.
- Rydh, C.J.,(1999). Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. *Journal of power sources*. 80, 21-29.
- Rydh, C.J., Sandén, B.A. (2005). Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements. *Energy Conversion and Management*. 46(11), 1957-1979.
- Rudberg, M., Waldemarsson, M., Lidestam, H. (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry. *Applied Energy*. 104, 487–496.
- Slišković, D., Grbić, R., Hocenski, Ž. (2012). Methods for plant data-based process modeling in soft-sensor development. *Automatika*. 52(4), 306-318.
- Sullivan, J.L., Gaines, L. 2010. A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs (No. ANL/ESD/10-7). Source of document. Argonne National Laboratory (ANL). [https://greet.es.anl.gov/publication-batteries\\_lca](https://greet.es.anl.gov/publication-batteries_lca). September 2016.
- Sullivan, J. L., Gaines, L. (2012) . Status of life cycle inventories for batteries. *Energy Conversion and Management*. 58, 134-148.
- Thanayankizil, L. V., Ghai, S. K., Chakraborty, D., Seetharam, D.P. (2012). Softgreen: Towards energy management of green office buildings with soft sensors. Source of document. Fourth International

- Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2012). IEEE. Bangalore, India. <https://pdfs.semanticscholar.org/3665/f7955f5cab8d65bc1d11be81a6b1969d9bfa.pdf> . July 2016.
- Thi Minh, N. (2009). Lead acid batteries in extreme conditions: accelerated charge, maintaining the charge with imposed low current, polarity inversions introducing non-conventional charge methods. Doctoral dissertation. Source of document. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00443615/document> . September 2016.
- Vesma, V. (2009). Energy Management Principles and Practice. Source of document. British Standards Institution. <http://group.skanska.com/globalassets/sustainability/environmental-responsibility/energy/energy-management-bip2187.pdf>. August 2016.
- Wang, D., Liu, J., Srinivasan, R. (2010). Data-driven soft sensor approach for quality prediction in a refining process. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 6(1), 11-17.
- Warne, K., Prasad, G., Rezvani, S., Maguire, L. (2004). Statistical and computational intelligence techniques for inferential model development: a comparative evaluation and a novel proposition for fusion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 17(8), 871-885.
- Weighall, M.J. (2003). Techniques for jar formation of valve-regulated lead-acid batteries. *Journal of power sources*. 116(1), 219-231.
- Weinert, N., Chiotellis, S., Seliger, G. (2011). Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 60(1), 41-44.
- Wong, Y.S., Hurley, W.G. Wölfle, W.H. (2008). Charge regimes for valve-regulated lead-acid batteries: Performance overview inclusive of temperature compensation. *Journal of Power Sources*. 183(2), 783-791.
- Worrell, E., 2011. Barriers to energy efficiency: International case studies on successful barrier removal. Development Policy, statistics and research branch. Source of document. United Nations Industrial Development Organization, 1-19. . <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/250419> August 2016.
- Zeng, Z., Wang, J. (2010). Soft Sensor Modeling of Ball Mill Load via Principal Component Analysis and Support Vector Machines. In Zeng, Z., Wang, J. (Eds), *Advances in Neural Network Research and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp 803-810.
- Zhang, K., Dai, X., Zhang, G., Ma, C. (2008). Left-inversion soft-sensing method for a class of nonlinear DAE sub-systems. In *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on* (pp. 5651-5656). IEEE. Chongqing, China.
- Zhanpei L., Xinyuan L., Tingzhang, L., Biyao, J., Yingqi, Z. (2014). Room Cooling Load Calculation Based on Soft Sensing. In: Minrui F., Chen P., Zhou, S., Yang, S, Qinglong, H (Eds). *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany*, pp 331 – 341.
- Zhao, Z., Zeng, D., Hub, Y., Gaob, S. (2015). Soft sensing of coal quality. *Thermal Science*. 19(1), 231-242.